

*UNIVERZITET U BANJA LUCI
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
BANJA LUKA*

DIPLOMSKI RAD:

**ZAŠTITA ELEMENATA ELEKTROENERGETSKIH
SISTEMA OD ATMOSFERSKOG PRAŽNENJA**

MENTOR:
PROF.DR STOJAN NIKOLAJEVIĆ

KANDIDAT:
DAVOR PRERADOVIĆ

BANJA LUKA, OKTOBAR 2004.

SADRŽAJ:

SADRŽAJ:	2
1. UVOD	3
2. PRENAPONI	4
2.1. PODJELA PRENAPONA PREMA IEC 71-1 /1/	4
2.2. KARAKTERISTIKE PRENAPONA	6
2.3. ATMOSFERSKI PRENAPONI	7
2.3.1. Mehanizam nastanka atmosferskih pražnjenja	8
2.3.2. Energija groma	10
2.3.3. Parametri atmosferskih pražnjenja	10
2.4. PROSTIRANJE PRENAPONSKIH TALASA DUŽ VODA	14
2.4.1. Jednačina telegrafičara	14
2.4.2. Putujući talasi	19
3. ZAŠTITA ELEMENATA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA	23
3.1. PODJELA ZAŠTITNIH UREĐAJA OD ATMOSFERSKIH PRENAPONA	23
3.1.1. Gromobrani	23
3.1.2. Zaštitna užad	24
3.1.3. Zaštitna iskrišta	25
3.1.4. Odvodnici prenapona	25
4. CINK-OKSIDNI (ZnO) ODVODNICI PRENAPONA	32
4.1. KONSTRUKCIJA ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	32
4.2. OSOBINE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	34
4.3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	37
4.4. TERMIČKA STABILNOST ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	39
4.5. DODATNA OPREMA ODVODNIKA PRENAPONA	40
4.6. IZBOR ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	41
4.6.1. Određivanje parametara sistema	41
4.6.2. Provjera nenormalnih uslova rada	41
4.6.3. Izbor naznačenog napona	41
4.7. ISPITIVANJE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	42
4.8. ZAŠTITNA ZONA ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	42
4.8.1. Zaštita visokonaponskih postrojenja ZnO odvodnicima prenapona	43
4.8.2. Zaštita distributivnih mreža ZnO odvodnicima prenapona	46
4.8.3. Zaštita transformatora ZnO odvodnicima prenapona	48
4.9. MONTAŽA ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	53
4.10. PODACI ZA NARUDŽBU ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	53
4.11. ODRŽAVANJE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA	53
5. ZAKLJUČAK	54
6. PRILOG	55
7. LITERATURA	59

1. UVOD

Pod prenaponom se podrazumjeva svako povišenje napona između dvije tačke koje stvara električno polje između njih tako da ono može biti opasno po oštećenje izolacije između njih, tj. između tih tačaka usljed jakog polja može doći do preskoka ili proboja izolacije.

Prenaponi se prema uzroku nastanka mogu podijeliti na dva osnovna tipa:

- Spoljašnji ili atmosferski prenaponi
- Unutrašnji

Spoljašnji ili atmosferski prenaponi nastaju usljed atmosferskih pražnjenja u elemente elektroenergetskih objekata ili u njihovoj blizini. Pri direktnim atmosferskim pražnjenjima u elemente elektroenergetskih sistema pojavljuju se vrlo velike struje koje izazivaju visoke napone na objektima, od kojih se oprema u postrojenjima mora štititi. U slučaju atmosferskog pražnjenja u blizinu elektroenergetskog objekta dolazi do indukovanja prenapona, koji mogu biti opasni u mrežama srednjih i niskih napona. Visina atmosferskih prenapona zavisi od energije atmosferskog pražnjenja, mada se primjena odgovarajućih zaštitnih mjera ograničava na niže vrijednosti. Atmosferski prenaponi su aperiodičnog oblika na mjestu nastanka, mada mogu pri prostiranju da izazovu oscilacije na dijelovima mreže. U frekvencijskom spektru naponskog talasa nastalog atmosferskim pražnjenjem pojavljuju se najviše učestanosti od 1 MHz do 5 MHz koje odgovaraju početnom periodu (čelo talasa).

Unutrašnji prenaponi nastaju usljed poremećaja u samom sistemu. Dije se prema uzroku na: sklopne ili komutacione i privremene ili povremene prenapone.

U zaštitna sredstva od atmosferskih prenapona spadaju zaštitna užad na vodovima i postrojenjima, gromobranski štapovi u postrojenjima, iskrišta i odvodnici prenapona koji su obrađeni u trećem dijelu ovog rada.

U četvrtom dijelu rada su obrađeni ZnO odvodnici prenapona kako sama konstrukcija, tako i njegove osnovne karakteristike, izbor, mjesta postavljanja u sistemu, zaštitna zona, montaža i ispitivanja.

U prilogu je dat primjer izbora ZnO odvodnika prenapona za 20 kV mrežu koja je uzemljena preko metalnog otpornika 40 Ω . U tom primjeru je data i provjera energetskog naprezanja odvodnika prenapona.

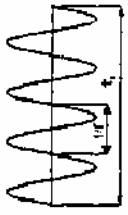
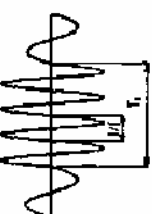
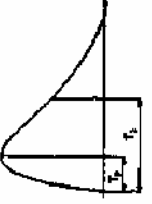
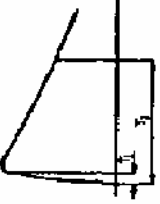

2. PRENAPONI

2.1. PODJELA PRENAPONA PREMA IEC 71-1 /1/

Naponi i prenaponi se dijele prema njihovom obliku i trajanju, te se mogu podijeliti u sljedeće klase:

- **Trajni napon pogonske frekvencije:** ima konstantnu efektivnu vrijednost i trajno je priključen na stezaljke opreme.
- **Privremeni prenapon:** je prenapon pogonske frekvencije relativno dugog trajanja. Može biti neprigušen ili slabo prigušen. U nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije.
- **Prelazni prenapon:** je kratkotrajni prenapon trajanja nekoliko μs ili kraći. Prelazni prenaponi podijeljeni su na:
 - a) Prenapone **polaganog porasta čela (sklopni):** su prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $20\mu s < T_p < 5000\mu s$, i trajanjem začelja od $T_2 < 20ms$.
 - b) Prenapone **brzog porasta čela (atmosferski):** su prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $0.1\mu s < T_i < 20\mu s$, i trajanja začelja od $T_2 < 300ms$.
 - c) Prenapone **vrlo brzog porasta čela:** su prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $T_f < 0.1\mu s$, ukupnog trajanja $< 3ms$. Oni su obično superponirani oscilacijama frekvencija $30kHz < f < 100MHz$.
- **Kombinovani prenaponi:** sastoje se od dvije ili više komponenti istovremeno, a opterećuju izolaciju opreme priključenu između zemlje i faze. Dije se prema komponenti više vršne vrijednosti.

Tabela 2-1. Vrste napona i ispitivanja

VRSTE NAPONA	NISKA FREKVENCIJA		PRELAZNI		
	TRAJANI	PRIVREMENI	POLAGANI (sklopni)	BRZI (atmosferski)	VRLO BRZI
Oblik napona					
Područje oblika napona	$f = 50$ ili 60 Hz $T_1 \geq 3600$ s	$10 < f < 500$ Hz $3600 \geq T_1 \geq 0.03$ s	$5000 > T_p > 20 \mu s$ $20 \text{ ms} \geq T_1$	$20 > T_p > 0.1 \mu s$ $300 \text{ ms} \geq T_1$	$100 > T_p > 3 \text{ ms}$ $0.3 > f_1 > 100 \text{ MHz}$ $30 > f_2 > 300 \text{ kHz}$ $3 \text{ ms} \geq T_1$
Standardni oblik napona	$f = 50$ ili 60 Hz T_1 (*)	$48 < f < 62$ Hz $T_1 = 60$ s	$T_1 = 250 \mu s$ $T_2 = 2500 \mu s$	$T_1 = 1.2 \mu s$ $T_2 = 50 \mu s$	(*)
Standardno ispitivanje podnosivosti	(*)	Ispitivanje kratkotrajnim naponom 50 Hz	Ispitivanje sklopnim impulsom	Ispitivanje atmosferskim impulsom	(*)

2.2. KARAKTERISTIKE PRENAPONA

Osim pogonskog napona u nekoj mreži pojavljuju se i prenaponi koji mogu dostići znatne iznose. Svaka vrsta prenapona napreže izolaciju na poseban način. Na slici 2.1. su prikazani prenaponi prema iznosu i dužini trajanja. To su:

1. Najviši pogonski napon izražen kao efektivna vrijednost odgovarajućeg naponskog nivoa.
2. Privremena povišenja napona.

Prelazni prenaponi:

3. Polaganog porasta čela (sklopni prenaponi)
4. Brzog porasta čela (atmosferski prenaponi)
5. Vrlo brzi (VFT- very fast transient)

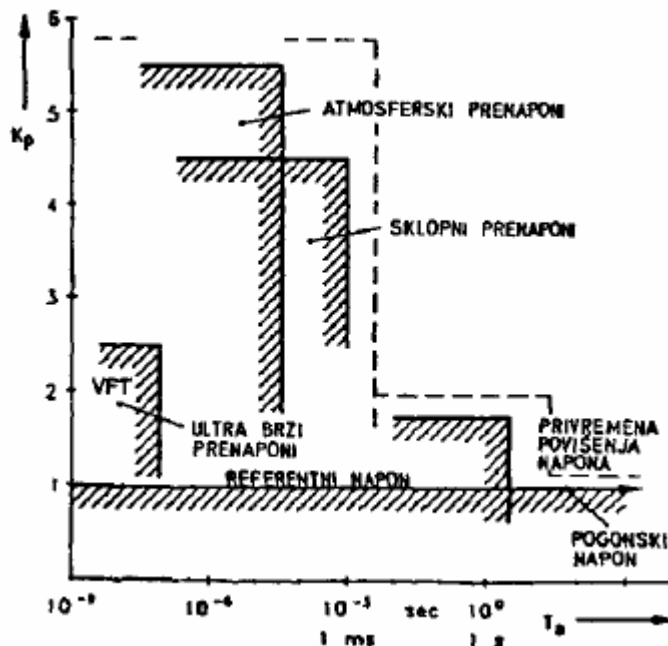
Sklopni, atmosferski i ultra brzi prenaponi imaju prelazni karakter. Oni dostižu amplitudu poslije kratkog vremena, nakon čega se prigušuju ili nestaju. Privremena prigušenja napona traju znatno duže, a njihovo trajanje ima red veličine sekundi ili čak sati.

Na ordinati je dat faktor prenapona K_p , koji se daje u odnosu na faznu vrijednost maksimalnog napona, tj.:

$$K_p = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{3}}} = 1.225 \frac{U_{MAX}}{U}$$

gdje je: U_{MAX} amplituda prenapona,

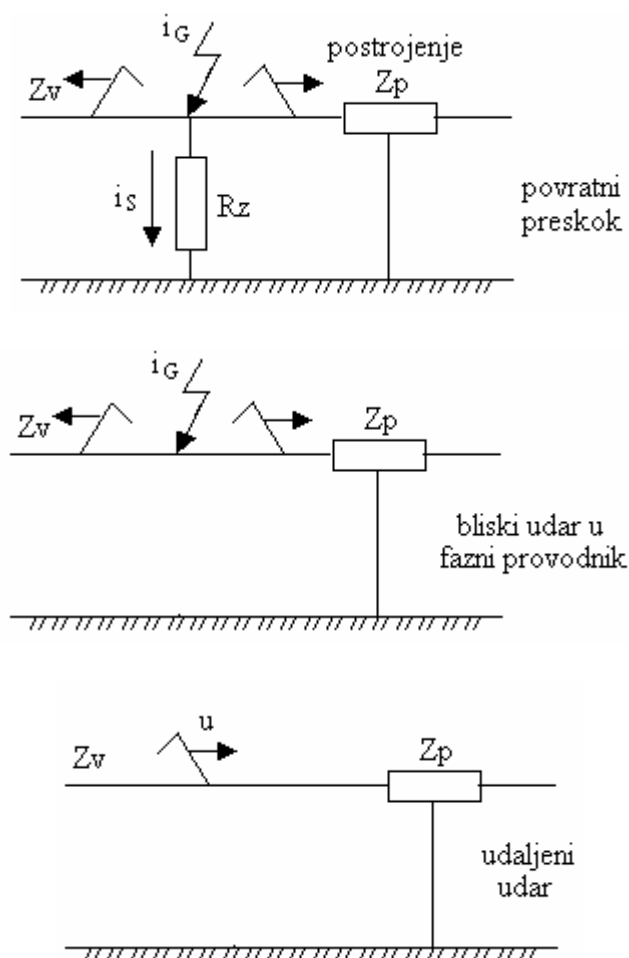
U efektivna vrijednost pogonskog napona (linijski napon).



Slika 2.1. Klasifikacija prenapona prema trajanju i faktoru prenapona

2.3.ATMOSFERSKI PRENAPONI

Atmosferski prenaponi koji se javljaju na nadzemnim vodovima mogu nastati na različite načine. Grom može udariti u zemlju pokraj voda, pri čemu se prenaponi indukuju na provodnicima. Najčešće grom udari u zaštitno uže nadzemnog voda ili u vrh stuba, nakon čega može doći do povratnog preskoka na fazni provodnik. Najopasniji su direktni udari u fazni provodnik, koji nastaju veoma rijetko, ali su ipak mogući. S obzirom na udaljenost između mjesta udara i posmatranog postrojenja mogu se razlikovati tri osnovna slučaja kao na slici 2.2.



Slika 2.2. Vrste udara u postrojenje

a) *Slučaj bliskog udara s preskokom:*

Ovaj slučaj nastaje pri udaru groma u zaštitno uže ili u stub dalekovoda uz preskok na fazni provodnik, ili prilikom udara groma u fazni provodnik uz preskok na stub dalekovoda. Na visinu prenapona veliki uticaj ima otpor uzemljenja dalekovoda.

b) *Slučaj bliskog udara u fazni provodnik bez preskoka:*

Bliski udar modeluje se strujnim izvorom. Ako je Z_g tasni otpor groma, Z_v talasni otpor voda, onda pri tome slijedi $Z_g \gg Z_v$. Talasi se šire na obje strane od mjesta udara, a napon talasa dobija se kao proizvod dijela struje groma i talasnog otpora voda. Ovo je najkritičniji slučaj pri razmatranjima o prenaponskoj zaštiti.

c) *Slučaj udaljenog mjesta udara:*

U ovom slučaju je atmosferski prenapon modelovan naponskim putujućim talasom koji se prostire nadzemnim vodom (i kablom) prije ulaska u postrojenje. Tjemena vrijednost talasa određena je izolacionim nivom nadzemnog voda. Prilikom prolaska talasa duž nadzemnog voda produžuje se čelo talasa. Približno se može uzeti da ovo produženje iznosi $1\mu s$ na svaki km dužine voda. Izobličjenje i prigušenje upadnog talasa naročito je izraženo u električnom kablom. U proračunima se može posmatrati bliski udar kao ekstremni slučaj, iako rijetko nastupa, jer postavlja znatno veće zahtjeve na pogonsku opremu nego npr. udaljeni udar.

2.3.1. Mehanizam nastanka atmosferskih pražnjenja

Fizički fenomeni vezani za atmosferska pražnjenja su oduvijek privlačila interesovanja, ali smo ih počeli razumijevati tek nedavno. Još je Frenklin eksperimentisao sa atmosferskim pražnjenjima 1744-1750, ali su glavna znanja o ovoj prirodnoj pojavi skupljenja u poslednjih 50 godina. Potreba za intenzivnijim proučavanjem se javila kada je trebalo zaštititi dalekovode od udara groma. Metode obuhvataju mjerenja struje groma, magnetnih polja, napona i upotrebu vrlo brzih fotografskih tehnika (rotirajuće kamere). Fundamentalno gledano, atmosfersko pražnjenje je zapravo vrlo duga električna iskra. Postoji nekoliko teorija o načinu akumulisanja naelektrisanja u oblacima. U grmljavinskom oblaku veće čestice su obično negativne, dok su manje pozitivne. Zbog toga je donji dio oblaka uglavnom negativno naelektrisan, a gornji dio pozitivno. Gledano u cjelini oblak je neutralan. Takođe može postojati više mjesta unutar oblaka koja sadrže naelektrisanja. Tipično centri negativnog naelektrisanja mogu biti bilo gdje između 500 m i 10000 m iznad zemlje. Pražnjenja prema zemlji uglavnom počinju na rubovima negativnih centara naelektrisanja. Naše oko zapaža munju kao jedno jedinstveno pražnjenje, iako se povremeno zapažaju i grane različitog intenziteta, koje završavaju u atmosferi, dok se svjetli glavni kanal proteže u cik-cak liniji prema zemlji. Vrlo brze fotografske tehnike otkrivaju da je najveći broj udara praćen uzastopnim udarima, koji se prostiru po provodnoj stazi koju je uspostavio prvi udar. Uzastopni udari se uglavnom ne granaju i njihova staza je sjajno osvijetljena. Sam razvoj pražnjenja se može podijeliti u nekoliko faza.

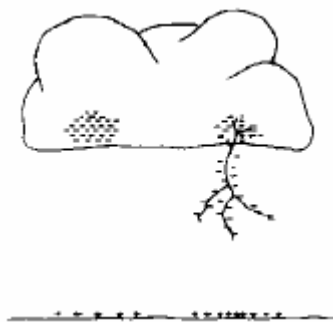
2.3.1.1. Prva faza: tačkasto pražnjenje

Tačkasto pražnjenje nastaje na visokim tornjevima, uzdignutim šiljcima i drugim elektrodama na kojima dolazi do izražene jonizacije vazduha usljed jakog električnog polja koje je jače od kritičnog polja za vazduh. Proces tinjavog pražnjenja na mjestima gdje je polje jače od kritičnog polja za vazduh naziva se koronom. Ona se manifestuje u vidu kratkotrajnih strujnih impulsa usljed obrazovanja lavina koje se šire u prostor do mjesta gdje je polje slabije od kritičnog. Kada dužina lavine postane veća od kritične, a broj slobodnih elektrona prevaziđe neku kritičnu granicu, prostorna naelektrisanja stvorena udarnom jonizacijom mogu da izazovu lokalna pojačanja polja koja stvaraju nove "sekundarne lavine". One se pružaju u pravcu linija najjačeg polja, obrazujući lepezastu ili razgranatu tvorevinu od tankih kanala, koja se naziva strimerom. Trajanje tačkastog pražnjenja može da bude od nekoliko minuta do nekoliko sati. Intenzitet struje tačkastih pražnjenja je najčešće ispod $1 mA$.

2.3.1.2. Druga faza: skokoviti lider

Prvo nastaje proces strimerovog pražnjenja u pravcu polja koji je slabo osvijetljen. Energija nastala proticanjem struje kroz kanale strimerovog pražnjenja pretvara se u toplotu. Toplotna energija vrši dalju termičku jonizaciju povećavajući provodljivost početka strimera. Ovaj dio kanala naziva se korijenom strimerovog pražnjenja. Dio tako obrazovanog jako jonizovanog kanala naziva se liderom. Uslovi za prerastanje strimerovog pražnjenja u svijetao kanal lidera

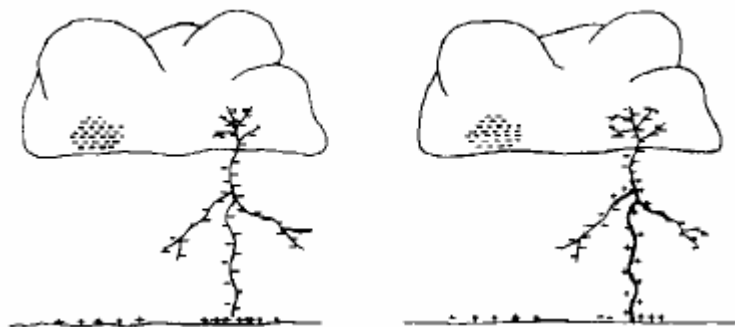
je dovoljno velika struja strimerovog pražnjenja. Na taj način se obrazuje jako jonizovan kanal na dužini od 5-50 m koji se završava svijetlim vrhom. Prostiranje ovoga kanala vrši se brzinom od oko 1/6 brzine svjetlosti. Nakon toga proces se za trenutak zaustavlja, da bi se od vrha kanala započeo novi skok u istom ili izmijenjenom pravcu. Ova faza atmosferskog pražnjenja naziva se skokovitim liderom. Smatra se da do zaostajanja u razvoju skokovitog lidera dolazi zbog potrebnog vremena da se u njegovom vrhu formira dovoljna koncentracija naelektrisanja za dalji razvoj pražnjenja. Prosječna brzina prostiranja skokovitog lidera zajedno sa pauzama je oko 1/1000 brzine svjetlosti. Struja skokovitog lidera se procjenjuje na nekoliko stotina ampera. Šematski prikaz napredovanja skokovitog lidera je dat na slici 2.3.



Slika 2.3. Razvoj skokovitog lidera

2.3.1.3. Treća faza: glavno pražnjenje

Kada se skokoviti lider dovoljno približi zemlji ili nekom istaknutom uzemljenom objektu, pojavljuju se strimeri iz glave skokovitog lidera i sa tog objekta. U trenutku kada se ovi strimeri susretnu, nastaje faza glavnog pražnjenja. U ovoj fazi dolazi do postepene neutralizacije naelektrisanja u kanalu groma iz zemlje prema oblaku, kao što je dato na slici 2.4.

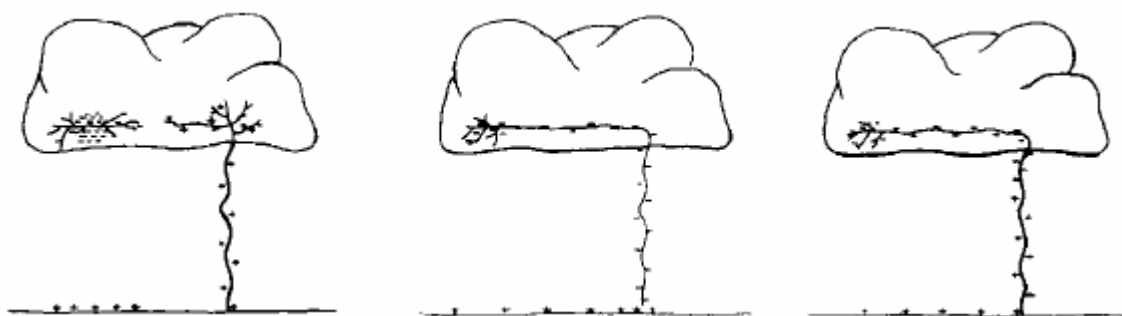


Slika 2.4. Glavno pražnjenje

Proces glavnog pražnjenja odlikuje se vrlo velikom strujom koja se kreće od nekoliko kA do preko $100 kA$. Glavno pražnjenje izaziva jak svjetlosni efekat zbog visoke temperature u kanalu groma i zvučni efekat usljed širenja kanala pri proticanju velike struje. Glavno pražnjenje izaziva razorne efekte na pogodnim objektima. Glavno pražnjenje se kreće od zemlje prema oblaku brzinom od oko 1/10 brzine svjetlosti. Intenzitet struje atmosferskog pražnjenja ne zavisi od ukupne količine elektriciteta u oblaku, već samo od količine elektriciteta koja se nalazi nagomilana u kanalu groma. Proces glavnog pražnjenja se gasi kada se potpuno neutrališe električni naboj u kanalu groma.

2.3.1.4. Četvrta faza: višestruki udari

Jedno glavno pražnjenje često nije dovoljno da izvrši neutralizaciju kompletnog električnog naelektrisanja oblaka. Zbog toga se događaju višestruki udari. Nakon prvog glavnog pražnjenja poslije pauze od nekoliko desetina *ms* od oblaka prema zemlji se razvija pražnjenje po predhodno jonizovanom kanalu, koji nazivamo strelovitim liderom. On je znatno brži od skokovitog lidera jer ne formira jonizovani kanal, već se kreće po već obrazovanom kanalu. Kada streloviti lider dodirne zemlju, javlja se drugo glavno pražnjenje koje je slabijeg intenziteta od prvog glavnog pražnjenja. Pod kompletnim pražnjenjem podrazumijeva se proces formiranja skokovitog lidera, prvog glavnog pražnjenja i uzastopnih pražnjenja. Za vrijeme jednog kompletnog pražnjenja može se pojaviti čak i do 50 pojedinačnih udara groma. Smatra se da preko 40% pražnjenja ima višestruku prirodu, sa uglavnom 3 do 4 pojedinačna udara. Na slici 2.5. simbolično je prikazan mehanizam nastanka višestrukih pražnjenja.



Slika 2.5. Proces višestrukih pražnjenja

Dijagram kompletnog pražnjenja, koji se obično dobija snimanjem pomoću specijalnih kamera sa linearno pokretnim filmom je kao na slici 2.6. Na slici 2.6. na gornjem dijagramu prikazan je prostorno-vremenski dijagram razvoja pražnjenja, a na donjem dijagramu vremenski oblik struje kompletnog pražnjenja.

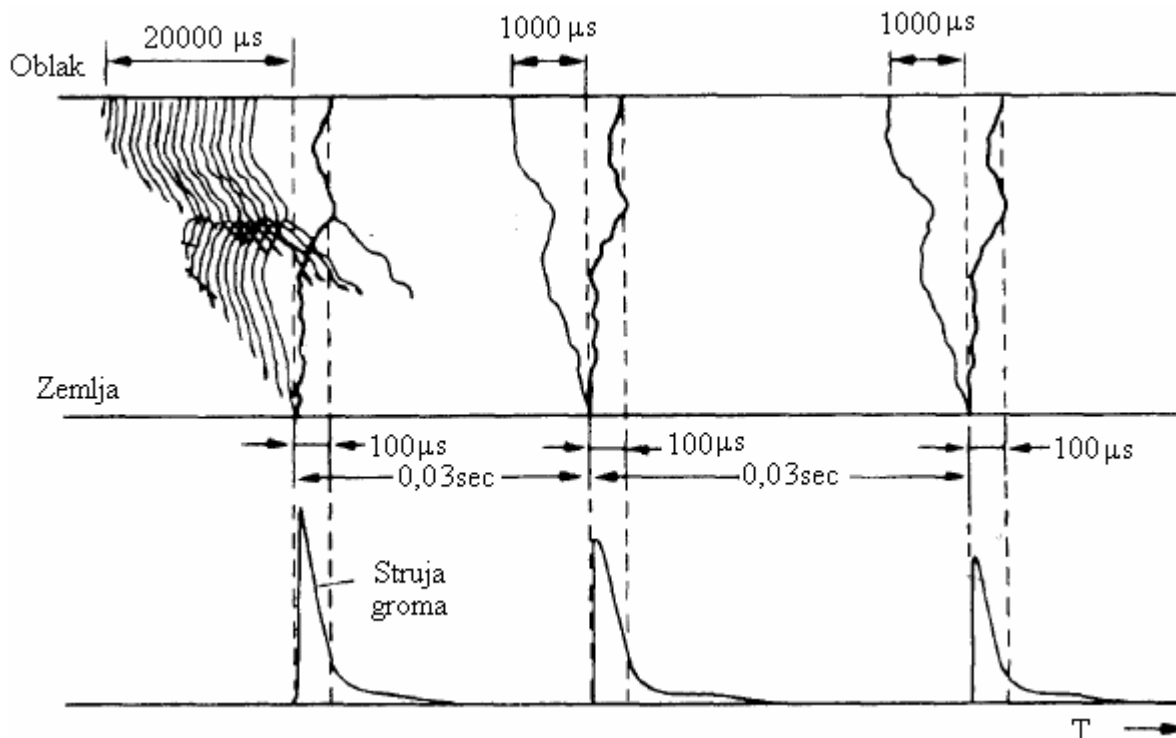
Udari groma između oblaka i zemlje čine samo 10% svih gromova. Većina pražnjenja tokom oluje se dešava između oblaka .

2.3.2. Energija groma

Kako bi procijenili energiju tipičnog pražnjenja kod udara groma, pretpostavimo potencijalnu razliku od 10^7 V za proboj između oblaka i zemlje i ukupno naelektrisanje od 20 C. Tada je disipirana energija $10 \cdot 10^7$ Ws ili otprilike 27,8 kWh u jednom ili više udara koji čine pražnjenje. Male količine energije se troše na jonizaciju molekula, pobuđivanje molekula, radijaciju, itd. Najveći dio energije se troši na naglo širenje zračnog kanala, a dio uzrokuje zagrijavanje pogođenih objekata na zemlji. Energija oslobođena tokom pražnjenja odgovara onoj potrošenoj za stvaranje naelektrisanja unutar oblaka.

2.3.3. Parametri atmosferskih pražnjenja

Pri procjenjivanju ugroženosti objekata od atmosferskih pražnjenja neophodno je poznavati pojedine električne i meteorološke parametre grmljavinske aktivnosti.



Slika 2.6. Prostorno-vremenski dijagram razvoja atmosferskog pražnjenja (gore) i vremenski oblik struje (dole)

2.3.3.1. Električni parametri

Osnovni električni parametri atmosferskih pražnjenja su:

- amplituda struje groma,
- oblik struje groma,
- strmina strujnog talasa,
- udarna količina elektriciteta

$$Q_{ud} = \int_{t_{ud}} idt$$

koja predstavlja količinu elektriciteta koja protekne za vrijeme trajanja udarne struje u vremenskom periodu t_{ud} ,

- količina elektriciteta prvog udara

$$Q = \int idt$$

koja obuhvata i struju skokovitog lidera i struju nakon završetka glavnog pražnjenja,

- ukupna količina elektriciteta kompletnog pražnjenja

$$Q_u = \sum_{i=1}^n \int idt$$

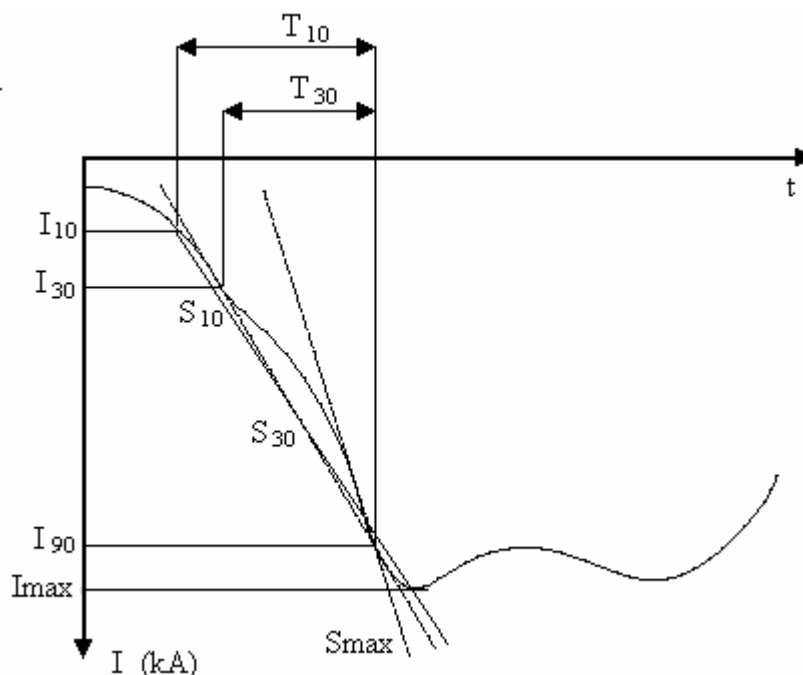
gdje je : n-broj uzastopnih pražnjenja,

- toplotni impuls kompletnog pražnjenja

$$A = \int i^2 dt$$

- broj pojedinačnih udara u jednom kompletnom pražnjenju.

Na slici 2.7. je dat tipičan vremenski oblik negativnog strujnog talasa prvog udara. Na slici su date definicije strmine struje groma.



Slika 2.7. Definicija strmine čela za tipičan oblik negativnog silaznog prvog lidera

Oznake na slici 2.7. imaju sljedeće značenje:

I_{10} – struja koja ima vrijednost 10% od prvog maksimuma struje,

I_{30} – struja koja ima vrijednost 30% od prvog maksimuma struje,

I_{90} – struja koja ima vrijednost 90% od prvog maksimuma struje,

T_{10} – vremenski interval između trenutaka kada nastupa I_{10} i I_{90} ,

T_{30} – vremenski interval između trenutaka kada nastupa I_{30} i I_{90} ,

S_{max} – maksimalna strmina talasa koji se pojavljuje u bilo kom trenutku na čelu,

S_{10} – srednja strmina talasa u vremenskom intervalu T_{10} :

$$S_{10} = \frac{I_{90} - I_{10}}{T_{10}}$$

S_{30} – srednja strmina talasa u vremenskom intervalu T_{30} :

$$S_{30} = \frac{I_{90} - I_{30}}{T_{30}}$$

2.3.3.2. Meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja

Meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja daju informaciju o grmljavinskoj aktivnosti na nekom području. Mogu se podijeliti na dvije grupe:

- Opšte meteorološke parametre pražnjenja,
- Parametre pražnjenja vezane za elektroenergetske objekte.

a) Opšti meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja

Jedan od najčešće korišćenih opštih meteoroloških parametara koji služi kao mjerilo grmljavinske aktivnosti na nekom području je keraunički nivo. Keraunički nivo T_d se definiše kao prosječan broj dana sa grmljavinom u toku jedne godine na određenom području, a određuje se osmatranjem. Osnovni nedostak korišćenja kerauničkog nivoa je nedostatak podataka o intenzitetu grmljavinske aktivnosti. Ovaj podatak se može dobiti na osnovu gustine pražnjenja u zemljinu površinu. Dnevna gustina pražnjenja N_d predstavlja broj

atmosferskih pražnjenja u toku jednog grmljavinskog dana u horizontalnu površinu zemlje po km^2 . Godišnja gustina pražnjenja N_g predstavlja broj atmosferskih pražnjenja u zemlju u toku jedne godine po km^2 . Postoji veza između godišnje gustine pražnjenja, dnevne gustine pražnjenja i kerauničkog nivoa koja je data sljedećom relacijom:

$$N_g = N_d T_d$$

U nedostatku mjernih vrijednosti, godišnja gustina pražnjenja uz rasipanje 95% može se procijeniti empirijskom formulom koja je predložena nakon statističke obrade velikog broja podataka dobijenih nizom mjerenja na raznim lokacijama u svijetu:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,35} [km^{-2} god^{-1}]$$

b) Broj pražnjenja u elektroenergetske objekte

Pri proučavanju ugroženosti elektroenergetskih objekata od atmosferskih pražnjenja najvažnije je procijeniti očekivani broj pražnjenja u objekte. Može se smatrati da je zona privlačnog dejstva dalekovoda za atmosferska pražnjenja srazmjerna visini dalekovoda. Usvaja se da je koeficijent srazmjernosti $k=3$ za vodove, a $k=3,5$ za stubove. Prenaponski talas se prostire simetrično na obe strane voda. Godišnji broj pražnjenja na 100 km voda može se iskazati sljedećim izrazom:

$$n_{1god,100km} = 2 \cdot 3 \cdot H \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot N_g = 0,6 H N_g$$

gdje su:

H – prosječna visina voda (m),

N_g – godišnja gustina pražnjenja po km^2 .

Broj pražnjenja u horizontalni nadzemni vod dužine 100 km za 100 grmljavinskih časova može se približno izračunati primjenom sljedećeg izraza:

$$n_{100h,100km} = 5 H_{uz} + \frac{H^2}{30} + b$$

gdje su:

H_{uz} – srednja visina zaštitnog užeta (m),

b - rastojanje između zaštitnih užadi ili faznih provodnika (m). Ovo rastojanje se naziva efektivna širina voda,

H – srednja visina faznih provodnika (m).

Budući da su postrojenja redovno dobro zaštićena od direktnog udara groma u fazne provodnike, broj prenaponskih talasa koji ulaze u postrojenje može da ugrozi izolaciju. Broj udara groma u pojedini dalekovod računa se iz empirijske formule predložene od strane radne grupe IEEE:

$$N_L = N_g (w + 4h_z^{1,09}) 10^{-3} [km^{-1} god^{-1}]$$

gdje su:

w - prosječni razmak između zaštitnih provodnika (m),

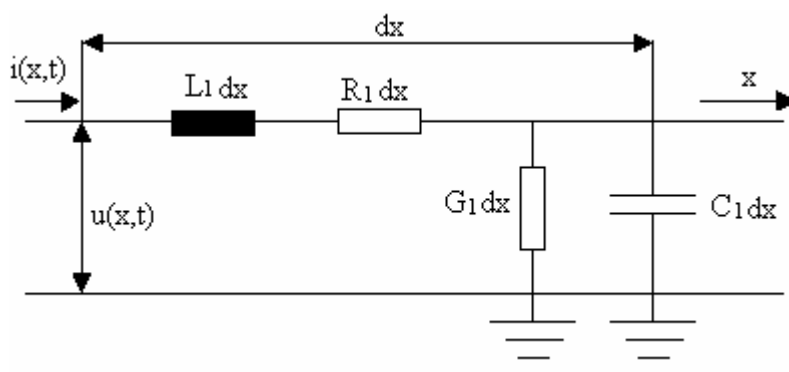
h_z – prosječna visina zaštitnog užeta (m).

Može se primjetiti da u gornjem izrazu broj udara groma u pojedini dalekovod N_L u prvom redu zavisi od prosječne visine provodnika iznad zemlje h_z , a važan je i podatak o srednjoj gustini udara groma.

2.4. PROSTIRANJE PRENAPONSKIH TALASA DUŽ VODA

2.4.1. Jednačina telegrafičara

Pri proučavanju brzih elektromagnetnih prelaznih procesa nadzemni vodovi se predstavljaju kao elementi sa raspodjeljenim parametrima. Na slici 2.8. je prikazana elementarna dionica voda dužine dx . Predpostavljeno je da su svi podužni parametri voda konstantni.



Slika 2.8. Dio realnog voda na dužini dx

Oznake na slici 2.8. su:

dx – dužina elementarne dionice nadzemnog voda,

L_1 – induktivnost po jedinici dužine voda,

R_1 – podužna otpornost voda usljed omskih gubitaka,

G_1 – podužna odvodnost voda usljed nesavršene izolacije,

C_1 – podužna kapacitivnost voda prema zemlji,

$u(x,t)$ – trenutna vrijednost napona u trenutku t na posmatranom mjestu x ,

$i(x,t)$ – trenutna vrijednost struje u trenutku t na posmatranom mjestu x .

Na osnovu slike 2.8. može se napisati diferencijalna jednačina za podužni pad napona na elementarnoj dionici voda:

$$-u(x,t) = L_1 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} dx + R_1 i(x,t) dx \quad (1)$$

Priraštaj struje na elementarnoj dionici voda dužine dx je:

$$-i(x,t) = C_1 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} dx + G_1 u(x,t) dx \quad (2)$$

U koliko se izrazi (1) i (2) podijele sa dx i odredi granična vrijednost izraza kada $dx \rightarrow 0$, dobija se:

$$-u(x,t) = L_1 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + R_1 i(x,t) \quad (3)$$

$$-i(x,t) = C_1 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + G_1 u(x,t) \quad (4)$$

Ako se na izraze (3) i (4) primjeni Laplasova transformacija, dobijamo sljedeći sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina:

$$-\frac{\partial U(x,t)}{\partial x} = (L_1 p + R_1)I(x,p) \quad (5)$$

$$-\frac{\partial I(x,p)}{\partial x} = (C_1 p + G_1)U(x,p) \quad (6)$$

gdje su:

p – Laplasov operator,

$U(x,p)$ – Laplasova transformacija napona $u(x,t)$ na mjestu x u trenutku t ,

$I(x,p)$ – Laplasova transformacija struje $i(x,t)$ na mjestu x u trenutku t .

Ako ponovo difrenciramo relaciju (5) po x i zamijenimo u relaciju (6) dobija se parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda po $U(x,p)$. Na sličan način, diferenciranjem relacije (6) po x i zamjenom u relaciju (5) dobija se parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda po $I(x,p)$:

$$\frac{\partial^2 U(x,p)}{\partial x^2} = (L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)U(x,p) \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 I(x,p)}{\partial x^2} = (L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)I(x,p) \quad (8)$$

Linearne parcijalne diferencijalne jednačine drugog reda (7) i (8) su poznate kao parcijalne diferencijalne jednačine telegrafičara. Mogu se napisati u opštoj formi u sljedećem obliku:

$$\frac{\partial^2 Y(x,p)}{\partial x^2} = \gamma^2(p)Y(x,p) \quad (9)$$

gdje su:

$Y(x,p)$ – električna veličina (napon ili struja) u Laplasovom domenu na mjestu x ,

$\gamma(p) = \sqrt{(L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)}$ - konstanta prostiranja talasa.

Rješenje parcijalnih diferencijalnih jednačina telegrafičara po naponu je:

$$U(x,p) = F_1(p)e^{\gamma(p)x} + F_2(p)e^{-\gamma(p)x} \quad (10),$$

a rješenje za struju se može dobiti zamjenom relacije (10) u (5) pa imamo:

$$I(x,p) = \frac{-F_1(p)e^{\gamma(p)x} + F_2(p)e^{-\gamma(p)x}}{Z_c} \quad (11),$$

gdje su:

$F_1(p)$ i $F_2(p)$ – koeficijenti koji zavise od graničnih uslova za početak i kraj voda,

Z_c – karakteristična impedansa voda u obliku:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1 p + R_1}{C_1 p + G_1}} \quad (12).$$

Rješenje jednačina (10) i (11) u vremenskom domenu mogu se izraziti u analitičkom obliku samo za dva slučaja:

1. Slučaj idealnog voda (voda bez gubitaka), kod koga je ispunjen uslov da je $R_1=0$ i $G_1=0$,
2. Slučaj voda na kome je ispunjen Hevisajdov uslov:

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1}$$

2.4.1.1. Slučaj idealnog voda:

U slučaju idealnog voda konstanta prostiranja ima sljedeći oblik:

$$\gamma(p) = p\sqrt{L_1 C_1} \quad (13),$$

ili
$$\gamma(p) = \frac{p}{v},$$

gdje je :

v – brzina prostiranja elektromagnetnih talasa.

Podužna kapacitivnost voda je:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2h}{R}} \quad \left(\frac{F}{m} \right),$$

a podužna induktivnost voda je.

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} \quad \left(\frac{H}{m} \right).$$

U slučaju idealnog voda rješenja jednačina telegrafičara u Laplasovom domenu imaju oblik:

$$U(x, p) = F_1(p, x)e^{\frac{px}{v}} + F_2(x, p)e^{-\frac{px}{v}} \quad (14)$$

$$I(x, p) = \frac{-F_1(p, x)e^{\frac{px}{v}} + F_2(p, x)e^{-\frac{px}{v}}}{Z_c} \quad (15)$$

Inverzijom Laplasove transformacije relacija (14) i (15) prelazimo u vremenski domen, tj. imamo:

$$u(x, t) = f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)h\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (16)$$

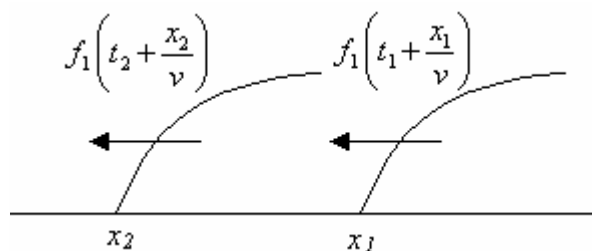
$$i(x, t) = \frac{-f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)h\left(t - \frac{x}{v}\right)}{Z_c} \quad (17)$$

gdje je: $h(t)$ – jedinična Hevisajdova funkcija definisana kao:

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{za } t \geq 0 \\ 0 & \text{za } t < 0 \end{cases}$$

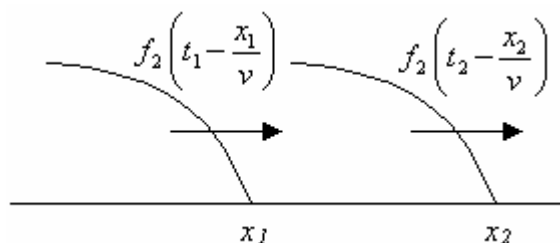
Izrazi (16) i (17) predstavljaju zbirove dva talasa koji se prostiru po vodu u suprotnim smjerovima.

Funkcija $f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)$ ima konstantnu vrijednost ako se talas prostorno pomijera brzinom v u pravcu koji odgovara opadanju x koordinate. Ovo je inverzni talas jer se prostire u smjeru suprotnom od pozitivne orijentacije x ose. Na slici 2.9. je prikazano prostiranje inverznog talasa duž voda.



Slika 2.9. Prostiranje inverznog talasa duž voda

Funkcija $f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)$ ne mijenja vrijednost sa promjenom argumenta $t - \frac{x}{v}$, a to znači da sa porastom vremena t mora i koordinata x da raste brzinom v . Ovaj talas se naziva direktnim talasom jer se prostire u pravcu koji se poklapa sa pozitivnom orijentacijom x ose. Na slici 2.10. je prikazano prostiranje direktnog talasa duž voda.



Slika 2.10. Prostiranje direktnog talasa duž voda

Važno je uočiti da u slučaju idealnog voda talasi pri prostiranju ne mijenjaju ni amplitudu ni oblik.

2.4.1.2. Slučaj voda na kome je ispunjen Hevisajdov uslov:

U slučaju kada je ispunjen Hevisajdov uslov koji je dat relacijom $\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1}$, konstanta prostiranja je u obliku:

$$\gamma(p) = \sqrt{(L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)} = \frac{p}{v} + \delta \quad (18),$$

gdje je δ koeficijent prigušenja dat u obliku:

$$\delta = \frac{R_1}{Z_c}$$

Rješenja jednačina telegrafičara u Laplasovom domenu za ovaj slučaj imaju oblik:

$$U(x, p) = F_1(p)e^{\frac{p}{v}e^{\delta x}} + F_2(p)e^{-\frac{p}{v}e^{-\delta x}} \quad (19)$$

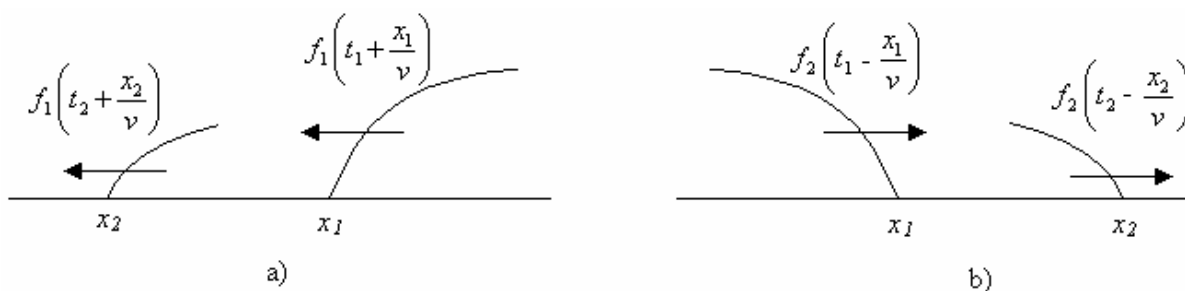
$$I(x, p) = \frac{-F_1(p)e^{\frac{p}{v}e^{\delta x}} + F_2(p)e^{-\frac{p}{v}e^{-\delta x}}}{Z_c} \quad (20)$$

Inverzijom Laplasove transformacije relacija (19) i (20) prelazimo u vremenski domen, tj. imamo:

$$u(x, t) = f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)e^{\delta x}h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)e^{-\delta x}h\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (21)$$

$$i(x, t) = \frac{-f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)e^{\delta x}h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)e^{-\delta x}h\left(t - \frac{x}{v}\right)}{Z_c} \quad (22)$$

Na vodu kod koga je ispunjen Hevisajdov uslov, rješenje jednačina telegrafičara predstavlja zbir dva talasa koja se prostiru u suprotnim smjerovima. Svaki od ovih talasa se pri prostiranju smanjuje po amplitudi, ali ne mijenja oblik. Na slici 2.11. prikazani su slučajevi: a) inverznog talasa i b) direktnog talasa, na vodu na kojem je ispunjen Hevisajdov uslov.



Slika 2.11. Prostiranje talasa duž voda sa zadovoljenim Hevisajdovim uslovom
a) inverzni talas, b) direktni talas

2.4.1.3. Slučaj realnog voda:

Kod realnih vodova je ispunjen uslov:

$$\begin{aligned} R_1 &> 0 \\ G_1 &> 0 \\ \frac{R_1}{L_1} &\neq \frac{G_1}{C_1} \end{aligned}$$

U ovom slučaju je koeficijent prostiranja dat u obliku:

$$\gamma(p) = \frac{1}{v} \sqrt{(p + \delta' + \beta)(p + \delta' - \beta)}$$

gdje su:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \text{ - brzina prostiranja,}$$

$$\delta' = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{L_1} + \frac{G_1}{C_1} \right) \text{ - modifikovani koeficijent prigušenja talasa}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{L_1} - \frac{G_1}{C_1} \right) \text{ - koeficijent izobličenja talasa}$$

Posle prelaska u vremenski domen može se uočiti da talas ne samo da mijenja svoju amplitudu već i oblik pri prostiranju.

2.4.2. Putujući talasi

Direktni prenaponski talas je definisan kao:

$$U_d(t) = f_2 \left(t - \frac{x}{v} \right) h \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

dok je inverzni prenaponski talas definisan kao:

$$U_i(t) = f_1 \left(t + \frac{x}{v} \right) h \left(t + \frac{x}{v} \right).$$

Direktni i inverzni strujni talasi su definisani sljedećim relacijama respektivno:

$$I_d(t) = \frac{f_2 \left(t - \frac{x}{v} \right)}{Z_c} h \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

$$I_i(t) = - \frac{f_1 \left(t + \frac{x}{v} \right)}{Z_c} h \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

Ukupan prenaponski talas na vodu se dobija sabiranjem direktnog i inverznog talasa:

$$U(t) = U_d(t) + U_i(t),$$

dok se ukupna struja u proizvoljnoj tački dobija na osnovu izraza:

$$I(t) = I_d(t) + I_i(t)$$

ili

$$I(t) = \frac{-U_i(t)}{Z_c} + \frac{U_d(t)}{Z_c}.$$

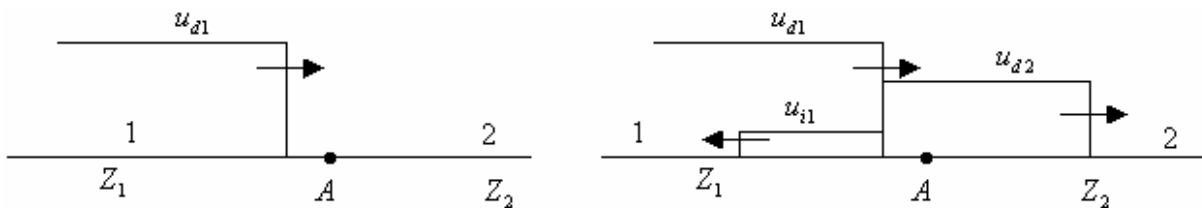
Ako se posmatra veoma dugačak vod po kome se prostire direktna komponenta prenaponskog talasa onda je:

$$Z_c = Z_{ul} = \frac{U_d(t)}{I_d(t)},$$

a za slučaj da se prostire samo inverzna komponenta prenaponskog talasa imamo:

$$Z_{ul} = \frac{U_i(t)}{-I_i(t)} = Z_c.$$

Možemo zaključiti da ulazna impedansa voda po kome se prostire samo jedna komponenta napona i struje, ima vrijednost koja je jednaka karakterističnoj impedansi voda i nezavisna od dužine voda. U realnim elektroenergetskim mrežama postoje mjesta nehomogenosti na vodovima. To su obično čvorne tačke u kojima se susiće više vodova, tačke u kojima se mijenja karakteristična impedansa voda. Te tačke se nazivaju tačkama diskontinuiteta i u njima dolazi do pretvaranja energije. Na slici 2.12. prikazana su dva idealna voda karakterističnih impedansi Z_1 i Z_2 koja se susiće u tački A .



Slika 2.12. Prelamanje i odbijanje talasa u tački nehomogenosti

Kada dođe prenaponski talas u tačku A dolazi do prostiranja i odbijanja talasa. Struja po vodu (1) je:

$$I_{d1} = \frac{U_{d1}}{Z_1}$$

Rezultantni napon u nekoj tački na vodu (1) je:

$$U_1 = U_{d1} + U_{i1}$$

Rezultantna struja po vodu (1) sa smjerom ka tački A je:

$$I_1 = I_{d1} + I_{i1}$$

Ako predpostavimo da na vodu (2) postoje samo talasi koji su nastali prelamanjem u tački diskontinuiteta, onda je ukupni napon u nekoj tački na vodu (2):

$$U_2 = U_{d2}$$

jer je inverzna komponenta $U_{i2} = 0$. Na isti način se može i struja izraziti samo na osnovu direktne komponente struje po vodu (2):

$$I_2 = I_{d2}$$

Pošto je tačka A zajednička za oba voda, onda po zakonu kontinuiteta naponi i struje s obe strane i lijevo i desno se ne mogu razlikovati, tj. mora biti zadovoljen uslov:

$$U_{d1} + U_{i1} = U_{d2}$$

$$\frac{U_{d1}}{Z_1} - \frac{U_{i1}}{Z_1} = \frac{U_{d2}}{Z_2}$$

Na osnovu ove dvije predhodne relacije dobijamo:

$$U_{d2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{d1}$$

$$U_{i1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{d1}$$

Za struju se dobijaju sljedeće jednačine:

$$I_{d2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I_{d1}$$

$$I_{i1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} I_{d1}$$

Direktna komponenta napona prelomljena u tački A koja se prostire po vodu (2) može se izraziti kao:

$$U_{d2} = \alpha_{1A} U_{d1},$$

gdje je:

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

α_{1A} – koeficijent prelamanja za naponski talas koji se prostire po vodu (1) ka tački A .

Inverzna komponenta napona po vodu (1) koja se odbila od tačke A je:

$$U_{i1} = \beta_{1A} U_{d1}$$

gdje je:

$$\beta_{1A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

β_{1A} – koeficijent odbijanja (refleksije) za naponski talas koji nailazi po vodu (1) ka tački A .

Direktna komponenta struje prelomljena u tački A koja se prostire po vodu (2) je:

$$I_{d2} = \alpha_{i1A} I_{d1}$$

gdje je:

$$\alpha_{i1A} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

α_{i1A} – koeficijent prelamanja za strujni talas koji nailazi po vodu (1) ka tački A .

Inverzna komponenta struje po vodu (1) koja se odbila od tačke A je:

$$I_{i1} = \beta_{i1A} I_{d1}$$

gdje je:

$$\beta_{i1A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

β_{i1A} – koeficijent odbijanja (refleksije) za strujni talas koji nailazi po vodu (1) ka tački A .

Koeficijenti prelamanja i odbijanja za struju su, za razliku od koeficijenata prelamanja i odbijanja za napon, obilježeni indeksom i . Između koeficijenata prelamanja i odbijanja, bez obzira da li se radi o naponskim ili strujnim koeficijentima, postoji sljedeća zavisnost:

$$\alpha - \beta = 1.$$

3. ZAŠTITA ELEMENATA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA

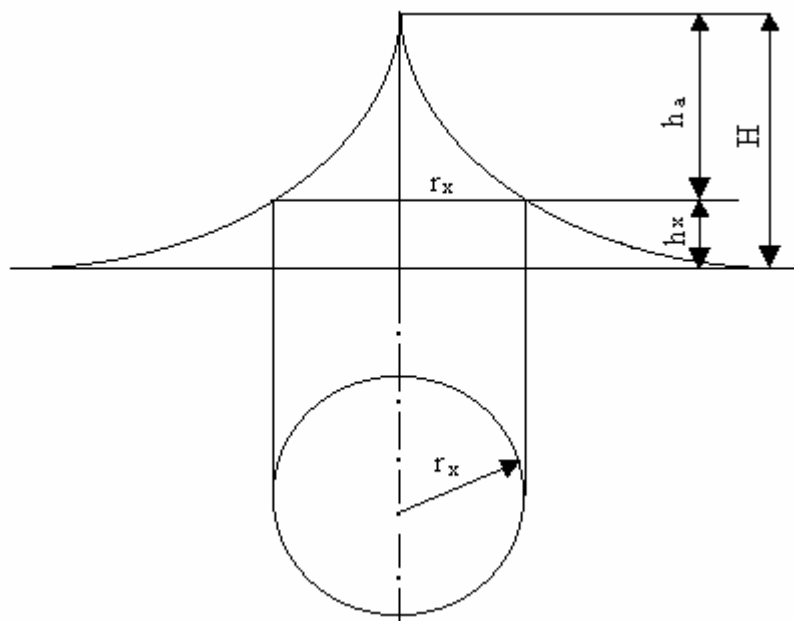
3.1. PODJELA ZAŠTITNIH UREĐAJA OD ATMOSFERSKIH PRENAPONA

U zaštitne uređaje od atmosferskih prenapona spadaju:

- gromobranski štapovi u postrojenjima,
- zaštitna užad na vodovima i postrojenjima,
- zaštitna iskrišta i
- odvodnici prenapona .

3.1.1 Gromobrani

Gromobrani su uređaji koji služe za zaštitu objekata od direktnog udara groma na taj način što na sebe primaju direktne udare groma. Postavljaju se u obliku metalne šipke sa vrhom okrenutim naviše, a donjim krajem vezanim za uzemljenje. Zaštitna zona gromobrana određuje se najčešće eksperimentalno ili na osnovu empirijskih formula. Zaštitna zona jednog gromobrana je data na slici 3.1. u vidu krive koja se spušta od vrha gromobrana do zemlje.



Slika 3.1. Zaštitna zona štapnog gromobrana

Ukupna zaštitna zona jediničnog gromobrana predstavlja konus čiji je horizontalni presjek krug poluprečnik r_x koji se na visini h_x određuje na osnovu izraza:

$$r_x = h_a \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{H}} p,$$

gdje je :

$$p = 1 \text{ koeficijent za visine } H \leq 30 \text{ (m), a } p = \frac{5,5}{\sqrt{H}} \text{ za visine } H > 30 \text{ (m),}$$

H – visina gromobrana,

h_x – visina štice objekta,

$h_a = H - h_x$ - aktivna visina zaštitnog šiljka.

Za određivanje zaštitne zone dva ili više gromobrana mogu su koristiti razni dijagrami dobijeni eksperimentalnim putem ili da se zona zaštite u složenijim slučajevima ispituje na modelima.

3.1.2. Zaštitna užad

Zaštitna užad takođe služe prvenstveno za zaštitu od direktnog udara groma mada imaju znatan uticaj i na smanjenje indukovanih prenapona. Zonu zaštite užeta je najbolje odrediti, ako je to moguće eksperimentalnim putem. Prema sovjetskim autorima zona zaštitnog užeta može se odrediti prema sljedećem empirijskom obrascu koji je sličan onome za gromobrane:

$$r_x = H \frac{1,2}{1 + \frac{h_x}{h_z}}$$

gdje su:

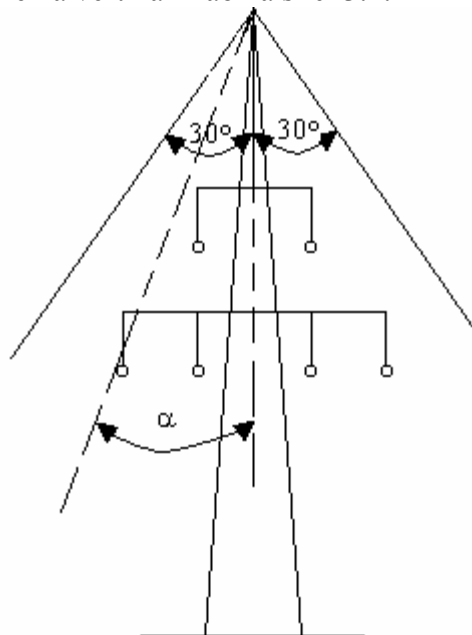
H – visina vješanja zaštitnog užeta,

h_x – visina koja se štiti,

f – ugib na sredini ragona,

$$h_z = H - f$$

Predhodne relacije važe za slučaje $H < 30$ (m) i $h_x \leq 0,5 H$. Kao najjednostavniji način za određivanje zone zaštitnih užadi predlaže se, da se povuku prave kroz zaštitno uže pod uglom od 25° do 30° sa obe strane prema vertikali kao na slici 3.2.



Slika 3.2. Zona štice zaštitnog užeta

Na slici 3.2. je sa α prikazan ugao između vertikale i prave koja prolazi kroz zaštitno uže i najudaljeniji fazni provodnik. Može se preko izraza:

$$\log P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_s}}{90} - 4$$

izračunati vjerovatnoća da će doći do direktnog udara u fazni provodnik. U ovom izrazu je h_s visina stuba, odnosno tačka vješanja zaštitnog užeta. Vidimo da sa povećanjem visine stuba i ugla α raste vjerovatnoća udara u fazni provodnik.

3.1.3. Zaštitna iskrišta

Zaštitno iskrište je namjerno oslabljeno mjesto u sistemu na kojem treba prije da dođe do preskoka nego na ostalim elementima sistema. Zaštitno iskrište se sastoji od dvije elektrode koje su sfernog oblika na međusobnom rastojanju u vazduhu, na kojima se tačno zna preskočni napon, koji je niži od preskočnog napona ostalih elemenata sistema. Jedna od elektroda je na potencijalu zemlje, a druga se nalazi pod naponom. Pri nailasku prenaponskog talasa međuelektrodno rastojanje biva preskočeno i prenapon se odvodi u zemlju. Zaštitna iskrišta na vodovima čine dopunsku prenaponsku zaštitu. Zaštita sa zaštitnim iskrištima je veoma jeftina, jednostavna i pouzdana, ali ima i dvije mane:

- Sječanjem atmosferskog prenapona proizvodi naponski talas vrlo velike strmine na čelu koji može da ošteti međunavojnu izolaciju aparata kao što su mjerni ili energetske transformatori. Zbog ovoga se iskrišta nikada ne postavljaju na prvi ili krajnji stub.
- Iskrište predstavlja uređaj koji ograničava prenapon, ali pravi kratak spoj posle reagovanja, tako da se aparat na kojem je iskrište priključeno mora isključiti djelovanjem neke od zaštita od kratkih spojeva.

3.1.4. Odvodnici prenapona

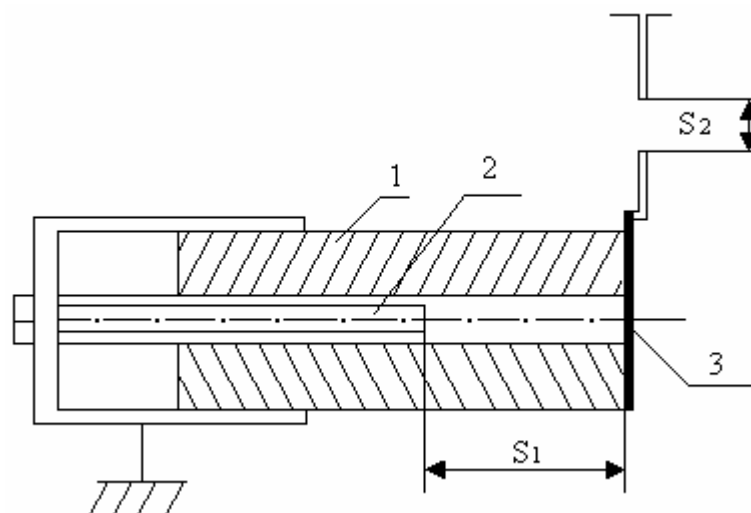
Odvodnici prenapona su uređaji koji se najviše koriste za zaštitu od prenapona. To su aparati koji imaju nelinearne otpornike vezane prema zemlji koji pri nailasku prenapona smanjuju svoju otpornost odvođeći dio energije u zemlju. Kada prođe prenapon ponovo povćavaju svoju otpornost na svoju prvobitnu vrijednost. Podjela odvodnika prenapona prema konstrukciji je na:

- Cijevni,
- Silicijum-karbidni (SiC) ili klasični i
- Metal oksidni ili cink-oksidni (ZnO).

3.1.4.1. Cijevni odvodnici prenapona

Cijevni odvodnici su iskrišta kod kojih je omogućeno gašenje luka. Elektrode iskrišta koje su najčešće u obliku rogova postavljaju se na određenom međusobnom rastojanju u specijalnu cijev, pa su zbog toga i dobili ime cijevni odvodnici. Cijev je napravljena od specijalnog materijala (tvrda guma, vodeno staklo) i ona ima sposobnost da svojim toplotnim dejstvom razara električni luk stvarajući gasove. Gasovi koji su se stvorili u cijevi, su pod velikim pritiskom i oni struje napolje kroz naročito predviđene otvore, te na taj način oduvavaju luk i gase ga. Između elektroda se stavlja komadić izolacionog materijala, koji je od istog materijala kao i cijev, tako da se povećava razvijanje gasova da bi se intenzivnije gasio luk. Na slici 3.3. je prikazan cijevni odvodnik. Oznake na slici 3.3. su:

- 1 - cijev odvodnika,
- 2 – uzemljena elektroda,
- 3 – elektroda pod naponom.



Slika 3.3. Cijevni odvodnik prenapona

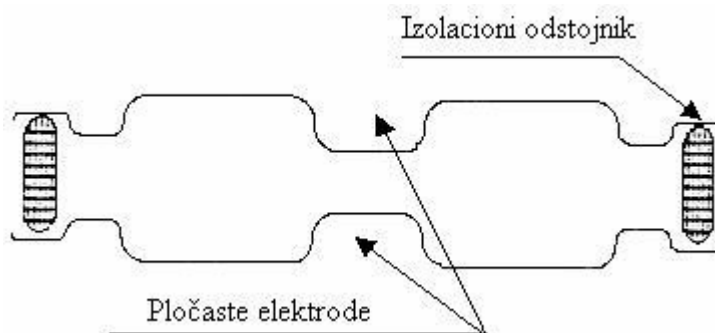
Iskrište S_1 je iskrište na kome se stvara luk koji razara cijev, dok iskrište S_2 služi da odvoji odvodnik prenapona od mreže u trenutku reagovanja. Glavne karakteristične veličine cijevnog odvodnika su:

- Nazivni napon odvodnika,
- Nazivna frekvencija,
- Klasa cijevnog odvodnika
- Granične propusne struje,
- Naizmjenični napon reagovanja i
- Udarni napon reagovanja, 100% napon reagovanja za talas $1,2/50 \mu\text{s}/\mu\text{s}$.

Ako se cijevni odvodnik koristi u mreži čije je zvjezdište izolovano reagovanje odvodnika predstavlja zemljospoj.

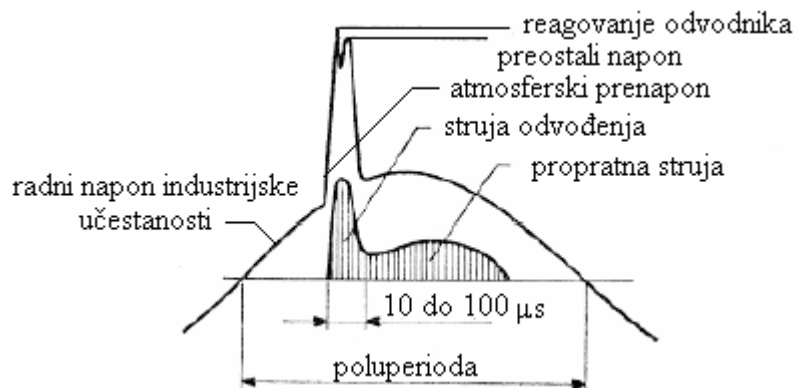
3.1.4.2. Silicijum-karbidni (SiC) ili klasični odvodnici prenapona

“Klasični” ventilni odvodnik prenapona se i danas najčešće susreće u postrojenjima, iako se u nova postrojenja najčešće ugrađuju metal-oksidni odvodnici prenapona, koji predstavljaju novu tehnologiju na tom području. Silicijum-karbidni (SiC) odvodnici prenapona spadaju u grupu savremenih odvodnika koju još čine i metal oksidni ili cink-oksidni (ZnO). Najjednostavnija konstrukcija SiC-a odvodnika prenapona je sa tanjirastim iskrištem kao na slici 3.4.



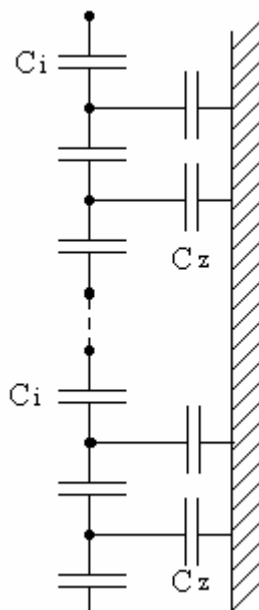
Slika 3.4. Konstrukcija SiC-a sa tanjirastim iskrištem

Klasični odvodnik prenapona se sastoji od serijski povezanih otpornika izrađenih od silicijum-karbida (SiC) i iskrišta. Čestice silicijum-karbida se nalaze u izolacionom materijalu od koga je napravljen odvodnik. Kada se na takav materijal dovede visoki napon, stvara se između čestica SiC jako električno polje, pri čemu se prostor između njih jonizuje i postaje provodan. Pri smanjenju napona slabi električno polje, a time i jonizacija oko čestica SiC, što dovodi do smanjenja provodnosti kanala, a samim tim dolazi do porasta otpora odvodnika. Osnovni problem kod odvodnika sa iskrištem je prekidanje propratne struje industrijske frekvencije nakon nestanka prenapona. Na slici 3.5. je prikazan dijagram napona i struja pri nailasku atmosferskog prenapona.



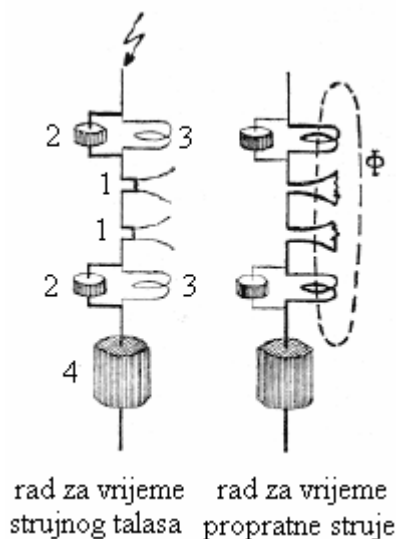
Slika 3.5. Dijagram napona i struje pri reagovanju odvodnika

Odvodnik prenapona reagovanjem ograničava prenapon. U trenutku reagovanja odvodnika prenapona, počinje kroz odvodnik da protiče struja odvođenja sve dok postoji prenapon. Nakon nestanka prenapona, pod uticajem radnog napona protiče propratna struja, koja je ograničena nelinearnim otpornicima odvodnika prenapona. U trenutku kada propratna struja prolazi kroz nulu, luk na iskrištima se gasi i odvodnik ponovo ima beskonačno veliku otpornost kao i prije reagovanja odvodnika. Odvodnik prenapona reaguje na $4U(p.u.)$. Napon reagovanja iskrišta zavisi od strmine talasa koji nailazi na odvodnik. Iskrište se tako oblikuje da karakteristika reagovanja odvodnika (volt-sekundna karakteristika iskrišta) bude što manje zavisna od strmine talasa koji nailazi na odvodnik. Da bi se osigurala zaštita od atmosferskih prenapona, a spriječilo reagovanje odvodnika prenapona na dugotrajne napone (sklopne napone ili napone industrijske učestanosti), iskrišta klasičnih SiC odvodnika prenapona su tako napravljena da imaju minimalan napon reagovanja upravo pri dejstvu talasa koji imaju strminu čela karakterističnu za atmosferske prenapone, dok im je napon reagovanja za talase manje strmine nešto veći. Sistem redno vezanih iskrišta se može predstaviti u zamjenskoj šemi rednom vezom kondenzatora, kao i otočno vezanih kondenzatora prema zemlji koji predstavljaju parazitne kapacitivnosti iskrišta. Na slici 3.6. je prikazana zamjenska šema odvodnika prenapona prije reagovanja. Kapacitivnosti C_i predstavljaju kapacitivnosti iskrišta, a C_z predstavljaju kapacitivnosti prema zemlji. Na slici 3.6. zanemarene su parazitne kapacitivnosti prema provodniku pod naponom. Nelinearni otpornici nisu ucrtani, jer njihovo prisustvo nema bitan uticaj na kapacitivnu raspodjelu napona. Da bi se osigurala ravnomjerna raspodjela napona između iskrišta kod odvodnika prenapona za visoke napone, postavljaju se elementi za raspodjelu napona od linearnih ili nelinearnih otpornika ili kondenzatora koji su vezani paralelno sa iskrištima. U normalnom radu kroz otpornike ili kondenzatore za raspodjelu napona protiče vrlo mala struja, ali oni omogućavaju da sva iskrišta u jednoj koloni budu pod istim naponom. Savremeni odvodnici prenapona imaju sistem za raspodjelu napona koji se sastoji od RC kola sa linearnim ili nelinearnim otpornicima.



Slika 3.6. Ekvivalentna šema odvodnika prenapona prije reagovanja

Klasični (silicijum-karbidni) odvodnici prenapona koji se koriste za ograničavanje sklopnih i atmosferskih prenapona mogu se graditi sa poboljšanom konstrukcijom iskrišta kod kojih se luk razvlači pod dejstvom magnetnog polja u komori za gašenje luka. Usljed aktivne uloge iskrišta u procesu dejonizacije luka, javlja se povišeni pad napona na luku koji ograničava prateću struju i može da izazove smanjivanje prateće struje i gašenje luka prije prirodnog prolaska prateće struje kroz nulu. Na slici 3.7. prikazana je pojednostavljena principijelna šema odvodnika prenapona sa iskrištima i magnetnim oduvavanjem luka.



Slika 3.7. Šema odvodnika prenapona sa iskrištima i magnetnim oduvavanjem luka

Oznake na slici 3.7. su sljedeće:

1. iskrišta,
2. nelinearni paralelni otpori,
3. kalem za stvaranje magnetnog polja,
4. nelinearni blok.

Za vrijeme djelovanja atmosferskog prenapona kroz odvodnik protiče velika udarna struja. Kalem predstavlja veliku induktivnu impedansu, tako da najveći dio struje prolazi kroz paralelni nelinearni otpornik. Na taj način se izbjegava razvlačenje luka pri djelovanju atmosferskog prenapona. Kada prođe atmosferski prenapon, na odvodniku nastavlja da djeluje napon industrijske frekvencije koji izaziva proticanje propratne sporo promjenljive struje. Ova struja prolazi kroz kalem, koji predstavlja manju impedansu od nelinearnog otpornika, što ima za posljedicu proizvodnju magnetnog polja koje djeluje na luk razvlačeći ga i izazivajući dodatni pad napona, što za posljedicu ima gašenje luka.

Osnovne karakteristike SiC odvodnika prenapona su:

- Nazivni napon: maksimalni napon industrijske frekvencije za koji je odvodnik projektovan da ispravno radi,
- Nazivna frekvencija: je frekvencija sistema . Kod nas je 50Hz, a u SAD-u 60Hz,
- Nazivna struja odvođenja: tjemena vrijednost udarne struje standardnog oblika $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$,
- Dugotrajna udarna podnosiva struja: je amplituda struje približno pravougaonog oblika, trajanja od $500\mu\text{s}$ do $3200\mu\text{s}$, u zavisnost da li je odvodnik predviđen za normalne ili teške uslove rada,
- Napon reagovanja industrijske frekvencije: je najmanja tjemena vrijednost podijeljna sa $\sqrt{2}$ napona industrijske frekvencije,
- Standardni udarni napon reagovanja ili 100% udarni napon: je minimalna tjemena vrijednost standardnog naponskog talasa oblika $1,2/50 \mu\text{s}/\mu\text{s}$,
- Napon reagovanja odvodnika na čelu talasa: je napon reagovanja odvodnika pri primjeni talasa koji linearno raste u vremenu do trenutka reagovanja,
- Volt-sekundna karakteristika: je zavisnost napona reagovanja odvodnika od vremena do reagovanja,
- Preostali napon odvodnika : je pad napona na odvodniku kada kroz njega protiče nazivna struja odvođenja,
- Strujno-naponska karakteristika ili karakteristika preostalog napona: je zavisnost preostalog napona od amplitude struje pražnjenja,
- Propratna struja odvodnika: je struja koja protiče kroz odvodnik poslije nestanka prenapona, usljed dejstva radnog napona mreže.

Standardne vrijednosti nazivnih struja odvođenja za SiC odvodnike prenapona su date u tabeli 3.1.

10	5	2,5	1,5
----	---	-----	-----

Tabela 3.1. Standardne vrijednosti nazivnih struja odvođenja (kA)

Ključni podatak pri izboru SiC odvodnika prenapon je maksimalni radni napon. Nazivni napon je najveća efektivna vrijednost naizmjeničnog napona industrijske frekvencije koju odvodnik stalno i sigurno podnosi i pri kojoj sigurno prekida ili gasi propratnu struju. To je naizmjenični napon koji odvodnik mora stalno podnositi prije i poslije struje odvođenja, s tim da mu iskrišta ne prorade. Vrijednost nazivnog napona se uzima nešto većom od najvećeg privremenog prenapona koji se može pojaviti, pa se taj napon uzima i kao napon gašenja odvodnika. Najveći privremeni napon se računa na osnovu sljedećeg izraza:

$$U_p = c_d c_f \frac{u_m}{\sqrt{3}}$$

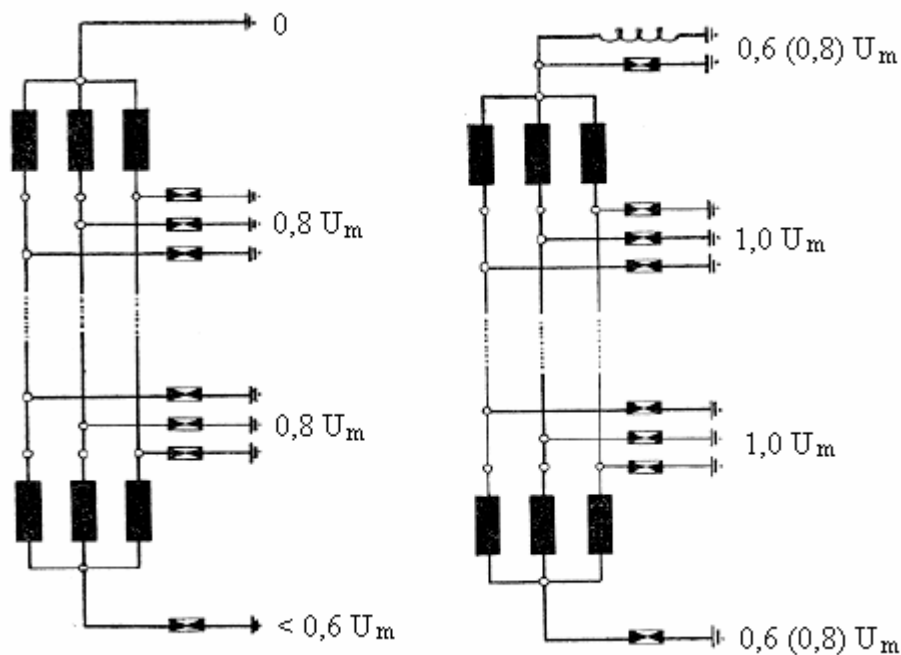
pri čemu je:

c_d – dinamički faktor prenapona. Njegova vrijednost za direktno uzemljenu i izolovanu mrežu uzima se da iznosi 1.07,

c_f – faktor povišenja napona usljed spoja jedne faze sa zemljom. Za direktno uzemljenu mrežu uzima se $c_f = 1.4$, a za neuzemljenu i slabo uzemljenu mrežu $c_f = 1.73$,

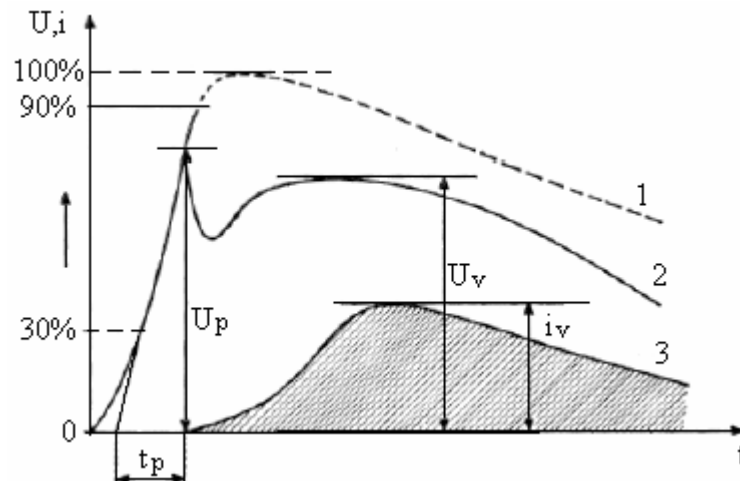
u_m – najveća vrijednost linijskog pogonskog napona neke mreže (npr. za 35kV to je 38kV).

Nazivni napon odvodnika treba biti veći od privremenog povišenja napona $U_n > U_m$, a za direktno uzemljenu mrežu $U_n > 0.8 U_m$. Nazivni napon odvodnika u zvjezdastima transformatora treba računski odrediti, a može da iznosi 60% pogonskog napona mreže.



Slika 3.8. Šema ugradnje odvodnika prenapona

Proradni napon je napon pri kojem proraduju iskrišta odvodnika prenapona. To može biti naizmjenični, jednosmjerni i udarni napon. Zanimljiv je naizmjenični napon frekvencije 50 Hz i ona vrijednost udarnog napona oblika $1,2/50 \mu s/\mu s$ pri kojoj će odvodnik proraditi. To je minimalni proradni napon od 50 Hz i 100% proradni udarni napon kojem je oblik $1,2/50 \mu s/\mu s$. Kod klasičnih odvodnika prenapona koji se ugrađuju za zaštitu postrojenja od 220 kV proradni napon mora biti toliko visok da odvodnici ne prorade zbog nailaska unutrašnjih prenapona. Obično su proradni i preostali napon podjednaki. Kod napona 400 kV i više odvodnici moraju proraditi i pri sklopnim prenaponima, koji svojom veličinom ugrožavaju postrojenje. Zato su obično proradni naponi za napone 400 kV i više barem 10-15% niži od najviših sklopnih prenapona. Na slici 3.9. je data definicija proradnog i preostalog napona.



Slika 3.9. Definicija proradnog i preostalog napona

Oznake na slici 3.9. imaju sljedeće značenje:

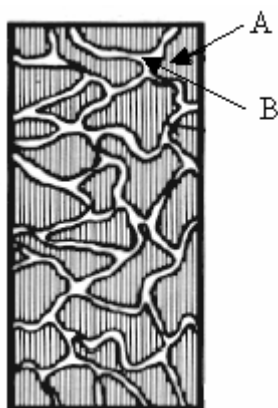
- 1 – naponski talas kada odvodnik ne bi proradio,
- 2 – udarni talas na odvodniku,
- 3 – strujni talas kroz odvodnik,
- t_p – proradno vrijeme,
- U_p – proradni napon,
- U_v – preostali napon,
- i_v – udarna struja kroz odvodnik.

4. CINK-OKSIDNI (ZnO) ODVODNICI PRENAPONA

Tehnološki napredak proizvodnje metal oksidnih nelinearnih materijala, u posljednjih dvadesetak godina, omogućio je masovniju proizvodnju i primjenu ovih materijala u izradi odvodnika prenapona bez klasičnih iskrišta. Prva primjena metal oksidnog odvodnika prenapona, sa korišćenjem cink-oksida (ZnO) kao metal oksidnog materijala, je zabilježena u Japanu za zaštitu visokonaponskih aparata u postrojenjima. Od 1975. godine prvi put je primjenjena u Evropi, kada je Švedska počela da ih koristi u zaštiti elektroenergetskog sistema Švedske. Danas gotovo svi poznati svjetski proizvođači odvodnika prenapona izrađuju cink-oksidne odvodnike prenapona umjesto klasičnih SiC, zbog jednostavnije konstrukcije i povoljnijih zaštitnih karakteristika. Kod izgradnje novih postrojenja uglavnom se ugrađuju ZnO odvodnici, dok se u starijim postrojenjima nalaze klasični odvodnici. Osnovna prednost ZnO odvodnika prenapona u odnosu na SiC je što nemaju iskrište i imaju povoljniji oblik strujno-naponske karakteristike otpornika.

4.1. KONSTRUKCIJA ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Cink-oksidni odvodnici prenapona sadrže samo diskove od nelinearnog otpornog materijala koji su zatvoreni u odgovarajuće cilindrično kućište. U početku proizvodnje ZnO odvodnika pojavljivali su se modeli sa iskrištem, dok se danas prave isključivo bez iskrišta. Keramički otpornici-varistori sastoje se uglavnom od čestica ZnO koje su dobijene sinterovanjem sa dodatkom aditiva u tečnom stanju, kao što su bizmut-oksid Bi_2O_3 , magnezijum-oksid, Sb_2O_3 i drugih, ukupno 9 aditiva, u vazduhu na temperaturi od oko 1200°C . Nelinearne karakteristike materijala isključivo zavise od vrste i odnosa aditiva u materijalu. Mikroskopska stuktura materijala nelinearnog otpornika je prikazana na slici 4.1.



Slika 4.1. Skica mikroskopske strukture nelinearnog otpornika ZnO odvodnika

Oznake na slici 4.1. su:

A – ZnO čestice,

B – međugranularni sloj.

Posmatranjem mikroskopske strukture materijala može se uočiti prisustvo mikroskopskih čestica između kojih je međugranularni prostor sastavljen od primjesa. Čestice ZnO su provodne i međusobno spojene serijski i paralelno. Prosječna veličina čestica ZnO je $10\text{-}20\mu\text{m}$. Od velike je važnosti homogenost unutar nelinearnog otpornika. Međugranularni

prostor varira oko $0,1\mu\text{m}$ i predstavlja barijeru koja biva probijena pri djelovanju povišenog napona. Na aktivnom jezgri koje je sastavljeno od serijski spojenih otporničkih blokova i međusobno učvršćenih specijalno ojačanim omotačem (najčešće od staklenih niti) postavlja se na vanjsko izolaciono kućište. U tom postupku došlo je do najvećeg napretka, tako da se sada kompaund izolacijske mase topi i direktno ubrizgava u kalup na predhodno postavljenom jezgri od otporničkih blokova. Bitno je da se kompaund lijepi i prijanja na stijenke jezgra, bez vazdušnih šupljina kako između kućišta i metal-oksidnih blokova, tako i u samom kućištu (tzv. "void free design"). Nova metoda proizvodnje kućišta ZnO odvodnika prenapona je kao na slici 4.2.



Slika 4.2. Primjer nove metode proizvodnje kućišta ZnO odvodnika

Najveći dio unutrašnjih šupljina u odnosu na ukupnu zapreminu odvodnika nije veća od 1%. Prijanjajuća veza između kućišta i metal-oksidnih blokova mora biti dovoljno jaka kako bi se spriječilo pucanje i odvajanje kućišta od blokova, a za vrijeme temperaturnih ciklusa koji često prate rad odvodnika u pogonu. Radi postizanja dovoljne dužine strujne staze i za najteže uslove rada (industrijsko ili atmosfersko zaprljanje) sastavni dio kućišta čine izolacioni šeširići različitih veličina i oblika (zavisno o dizajnu). Do osnovnih osobina ZnO otpornika može se doći na osnovu:

1. Mikroskopski električno polje je veliko u međuprostoru između čestica ZnO i u blizini njihovih granica, a malo je unutar ZnO čestica. Makroskopski je električno polje jednako raspodjeljeno unutar materijala.
2. Struja koja teče kroz otpornik prolazi kroz najmanji broj spojeva (najmanji otpor). Uz homogeni sastav mikrostrukture i raspodjela struje će biti jednaka.
3. Mikroskopski će do Džulovog zagrijavanja doći uglavnom na spojevima, ali makroskopski će apsorpcija energije biti homogena, ako je mikrostruktura i gustina struje homogena.

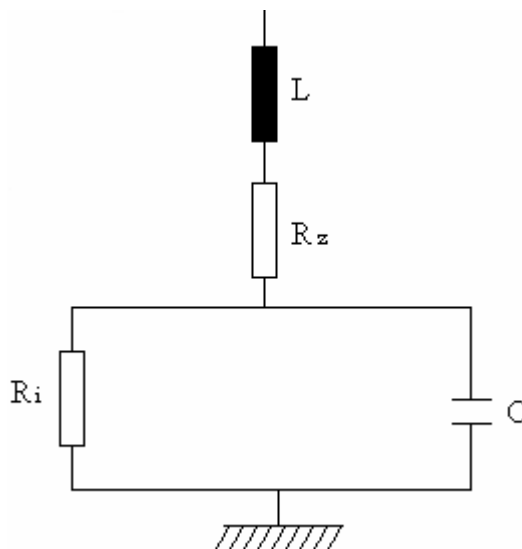
Zamjenska električna šema ZnO odvodnika je kao na slici 4.3. Oznake na slici 4.3. su:

$R_z = 10^{-2} \Omega\text{m}$ – otpornost zrna,

$R_i \in (10^8 \text{ mala polja} \div 10^{-2}) \Omega\text{m}$ – nelinearni otpor.

Poprečni presjek otpornika se određuje na osnovu sljedećih parametara:

- Očekivane amplitude struje udarnog pražnjenja,
- Maksimalno dozvoljene temperature odvodnika,
- Sposobnosti odvođenja toplote sa odvodnika.



Slika 4.3. Zamjenska električna šema ZnO odvodnika

Kod ZnO odvodnika postoji struja “curenja”, a to je struja koja protiče kroz odvodnik usljed postojanja radnog napona i ona je veoma mala, reda $(250 \div 500) \mu\text{A}$.

Najvažnija osobina otpornika osim nelinearnosti je i visoka mogućnost apsorpcije energije i velika termička provodnost.

4.2. OSOBINE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Cink-oksidni odvodnici prenapona imaju izrazito nelinearnu naponsko-strujnu karakteristiku, tako da uvijek napon ograničavaju na istu vrijednost propuštajući pri tome različite struje, do deklarisanе vrijednosti, a pri trajnom radnom naponu propuštaju veoma malu struju. Koeficijent nelinearnosti je zavisan o struji i nije konstantan i kreće se u opsegu $\alpha \in (30 \div 50)$. (Uz $\alpha = 1$ zavisnost struje i napona je linearna). Zgodan način prezentacije strujno-naponske karakteristike otpornika u eksponencijalnom obliku je preko referentnih napona i struja, kao u izrazu:

$$\frac{I}{I_{ref}} = \left(\frac{U}{U_{ref}} \right)^\alpha$$

gdje su:

I_{ref} , U_{ref} – referentni napon i struja,

α - koeficijent nelinearnosti.

Koeficijent nelinearnosti se mijenja sa režimom i može se izraziti u određenoj radnoj tački na osnovu sljedećeg izraza:

$$\alpha(U) = \frac{d(\ln I)}{d(\ln U)}$$

Ovaj koeficijent je ključna veličina od koje zavisi efikasnost prenaponske zaštite ZnO odvodnicima prenapona. Za određivanje kompletne karakteristike nelinearnog otpornika u širokom opsegu struja koristi se logaritamska srednja vrijednost koeficijenta nelinearnosti koja je data sljedećim izrazom:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{I_{\max}}{I_0}\right)}{\ln\left(\frac{U_{\max}}{U_0}\right)}$$

gdje su:

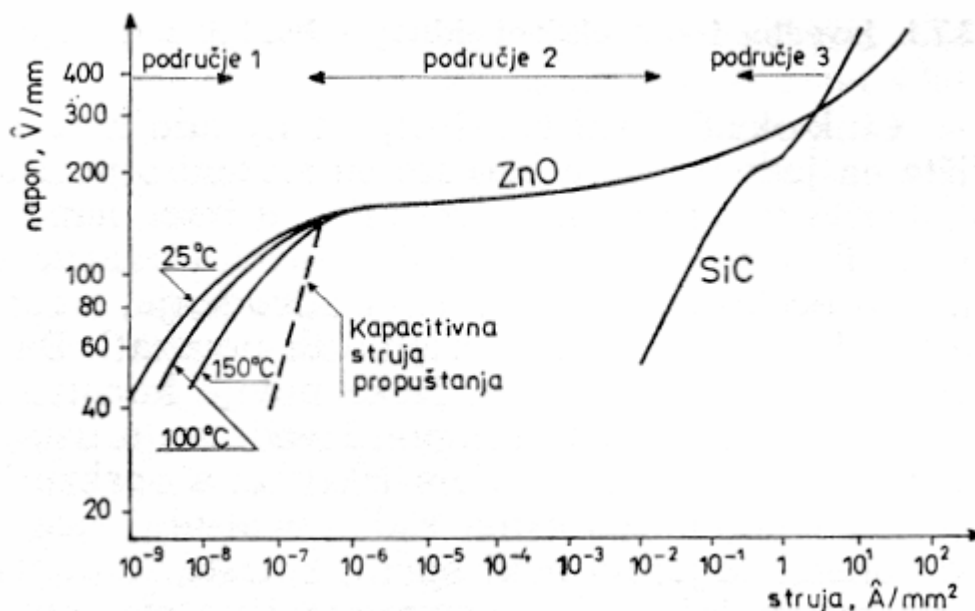
I_0 – dozvoljena stalna struja kroz odvodnik,

I_{\max} – maksimalna udarna struja pražnjenja koja se očekuje kroz odvodnik,

U_0 – napon na odvodniku pri struji I_0 ,

U_{\max} – napon na odvodniku pri I_{\max} .

Na slici 4.4. je prikazana strujno- naponska karakteristika ZnO odvodnika prenapona za širok dijapazon struja.



Slika 4.4. Strujno-naponska karakteristika ZnO odvodnika

Na slici 4.4. prikazana je i kriva klasičnog silicijum-karbidnog odvodnika prenapona sa serijskim iskrištem. Sa dijagrama napona i struje se vidi da se kod klasičnih odvodnika prenapona brže mijenja napon nego na cink-oksidsnom odvodniku. Na karakteristici se uočavaju tri područja rada cink-oksidsnog odvodnika prenapona. U samom početku je područje 1. (“prije proboja”), u kojem je struja proticanja zanemarljivo mala. Gustina struje u ovom području je približno $3 \cdot 10^{-7}$ A/mm². Relativna dielektrična konstanta je vrlo visoka i iznosi oko 700. Struja propuštanja u prvom području je pretežno kapacitivna. Kriva koja odgovara radnoj komponenti struje u ovom području izmjerena je jednosmjernim naponom, a kapacitivna naizmjeničnim 50(60) Hz. Pri jednosmjernom naponu koji odgovara trajnom naponu protiče struja od oko 0,1 mA, a pripadna kapacitivna komponenta pri 50 Hz za ovu vrijednost napona iznosi oko 0,5 mA. Zato što je u ovom području karakteristika jako osjetljiva na temperaturu, potrebno je odabrati odvodnik tako da radna temperatura ne bude veća od deklarirane.

Na drugom području karakteristike jako je izražena nelinearnost, a temperaturna zavisnost je zanemarljiva. Ova zona je karakteristična po naponu reagovanja. Struja se mijenja po zakonitosti:

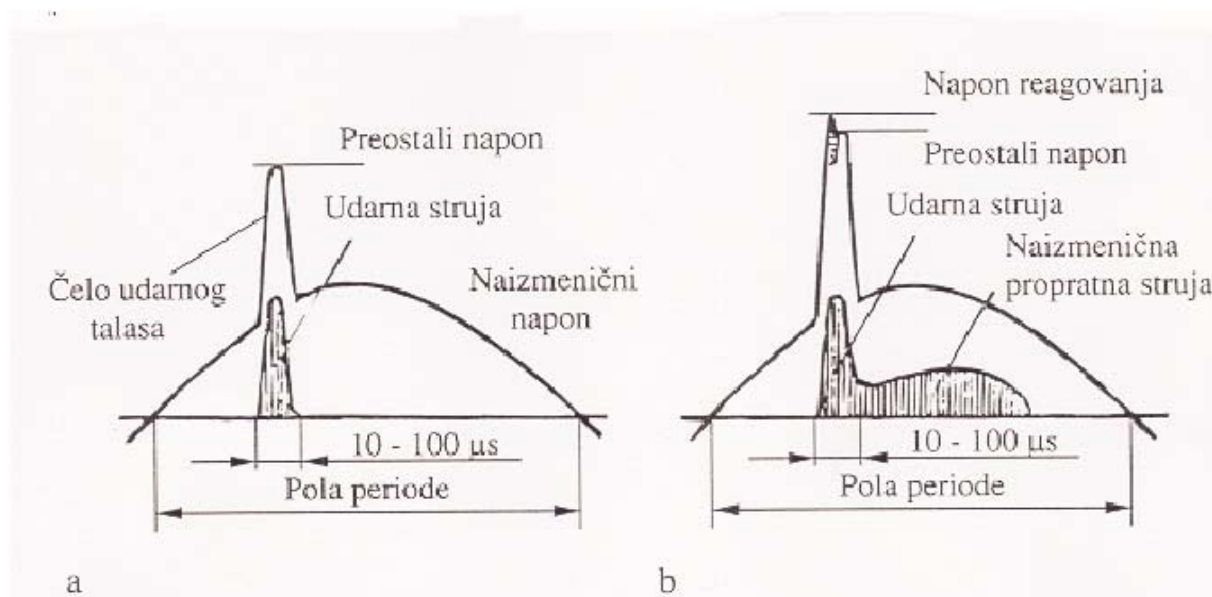
$$I = cU^\alpha$$

gdje je:

$\alpha \approx (30 \div 50)$ – koeficijent nelinearnosti.

Drugo područje od struje preko 1A izmjereno je udarnom strujom 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$.

Na trećem području karakteristika više nije tako nelinearna i ona odgovara omskoj provodnosti ZnO. Za mjerenje karakteristike primjenjuju se udari 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ ili 4/10 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$. Samo ograničenje prenapona na određeni zaštitni nivo prikazano je na slici 4.5.



Slika 4.5. Skica prenapona superponiranog na radni napon: a) cink-oksidni odvodnik, b) silicijum-karbidni odvodnik

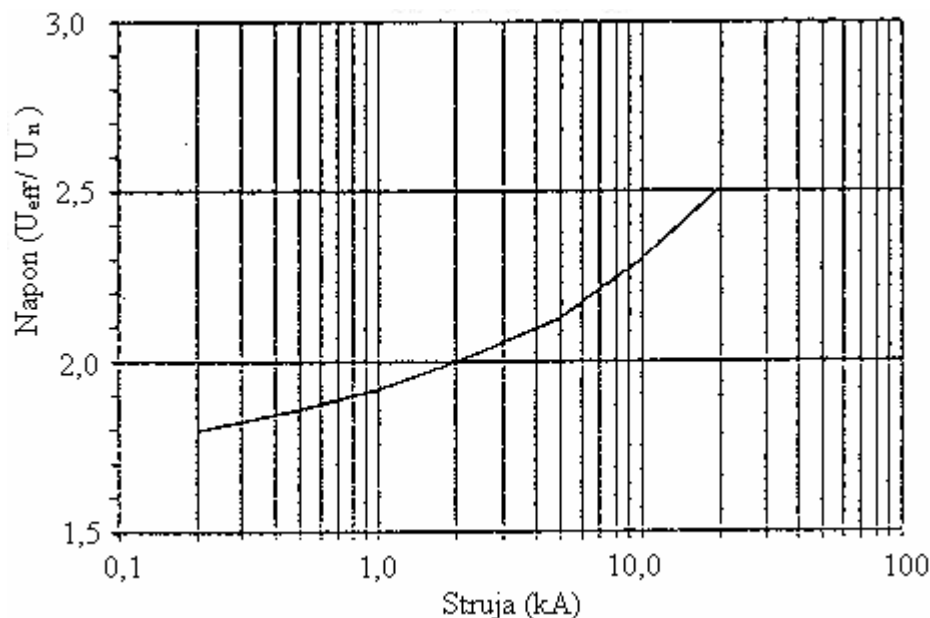
Razlike između SiC i ZnO odvodnika prenapona su sljedeće:

- SiC reaguje kada naiđe prenapon viši od napona reagovanja, nakon čega napon pada na preostali napon. U trenutku reagovanja odvodnika dolazi do naglog smanjenja napona što može da izazove prelazni režim,
- ZnO odvodnik nema napona reagovanja tako da poslije porasta napona preko koljena dolazi do provođenja struje,
- ZnO odvodnik nema prpratnu struju nakon prestanka djelovanja prenapona jer se sa nestankom prenapona odvodnik automatski vraća u stanje velike otpornosti kad kroz odvodnik protiču male stuje.

Aktivni dio metal-oksidnih odvodnika sastoji se od cilindričnih otpornika u obliku pločica. Broj pločica zavisi od nazivnog napona odvodnika. One se nalaze u hermetički zatvorenom porcelanskom kućištu, koje može biti i od silikona (novije izvedbe). Prostor između pločica i silikonskog kućišta može biti ispunjen gasom ili se porcelansko kućište nanosi direktno na pločice. Rasipni kapacitet pločica prema uzemljenim dijelovima uzrokuje nelinearnu raspodjelu potencijala duž odvodnika kod pogonskog napona, slično kao kod izolatorskog lanca. Nelinearnost se povećava sa dužinom odvodnika. Zato se za odvodnike koji su predviđeni za mrežu viših nazivnih napona (iznad 220 kV) ugrađuju prstenovi za izjednačavanje potencijala, koji kompenzuju djelovanje rasipnih kapaciteta. U poslednjih

desetak godina u novim se postrojenjima ugrađuju isključivo ZnO odvodnici. Razlog tome je veća efikasnost u pogonu, niži preostali napon (pogotovo kod napona strmog čela), i dobro podnošenje zagađenja.

Zaštitna karakteristika ZnO odvodnika prenapona je definisana krivom preostalog napona u opsegu udarnih struja koje se pojavljuju kroz odvodnik pri djelovanju prenapona. Na slici 4.6. je prikazana zaštitna karakteristika ZnO odvodnika prenapona.



Slika 4.6. Zaštitna karakteristika ZnO odvodnika prenapona

Proizvođači daju zaštitnu karakteristiku tabelarno za standardne strujne talase 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ za atmosferske prenapone i za strujni talas čela dužeg od 30 μs za sklopne prenapone. Tipičan oblik podataka koje daju proizvođači dati su u tabeli 4.1.

Vrsta talasa		Sklopni talas		Atmosferski talas			
Maks. trajni napon kV _{eff}	Naznačeni napon kV _{eff}	1 kA kV	3 kA kV	5 kA kV	10 kA kV	20 kA kV	40 kA kV
312	253	630	650	736	769	845	921
336	272	670	699	792	827	909	990
360	292	727	750	850	888	975	1063

Tabela 4.1. Izvod iz tablice proizvođača ZnO odvodnika prenapona

4.3.OSNOVNE KARAKTERISTIKE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Kod ZnO odvodnika prenapona se prema JUS IEC 99-4/1995 definišu sljedeće karakteristike:

a) Naznačeni napon odvodnika U_r (*rated voltage of an arrester*):

Najviša dozvoljena efektivna vrijednost napona industrijske frekvencije između priključaka odvodnika, pri kojoj je on predviđen da ispravno radi u uslovima prenapona, kako je definisano u ispitivanju funkcionisanja u radnim uslovima. Naznačeni napon se koristi kao referentni parametar za specifikaciju radnih karakteristika.

b) Trajni radni napon odvodnika U_c (*continuous operating voltage of an arrester*):
Trajni radni napon je specificirana dozvoljena efektivna vrijednost napona industrijske frekvencije, koja se može trajno dovesti na priključke odvodnika.

c) Naznačena frekvencija odvodnika (*rated frequency of an arrester*):
Frekvencija mreže za koju je odvodnik pravljen.

d) Strma udarna struja (*steep current impulse*):
Udarna struja sa konvencionalnim trajanjem čela od 1 μ s, sa takvim granicama podešavanja opreme da se izmjerene vrijednosti kreću od 0,9 μ s do 1,1 μ s. Konvencionalno vrijeme do polovine vrijednosti na začelju ne treba da je duže od 20 μ s.

e) Atmosferska udarna struja (*lighting current impulse*):
Udarna struja 8/20 μ s/ μ s sa granicama podešavanja takvim da se izmjerene vrijednosti za konvencionalno trajanje čela kreću od 7 μ s do 9 μ s, a vrijeme do polovine na začelju od 18 μ s do 22 μ s.

f) Nazivna struja odvođenja odvodnika I_n (*nominal discharge current of an arrester*):
Tjemena vrijednost atmosferske udarne struje koja služi za razvrstavanje odvodnika

g) Dugotrajna udarna struja (*long duration current impulse*):
Pravougaona udarna struja sa brzim usponom do maksimalne vrijednosti, koja zatim ostaje uglavnom konstantna u toku utvrđenog perioda, a zatim brzo pada na nulu. Pravougaonu udarnu struju definišu sljedeći parametri: polaritet, tjemena vrijednost, konvencionalno trajanje tjemena i ukupno konvencionalno trajanje.

h) Udarne struje odvodnika velike amplitude (*high current impulse of an arrester*):
Tjemena vrijednost struje odvođenja oblika talasa 4/10 μ s/ μ s koja se koristi za provjeru stabilnosti odvodnika pri direktnim udarima groma.

i) Sklopna udarna struja odvodnika (*switching current impulse of an arrester*):
Tjemena vrijednost struje odvođenja sa konvencionalnim trajanjem čela dužine od 30 μ s i kraćim od 100 μ s i konvencionalnim vremenom do polovine vrijednosti na začelju, približno dvostruko dužim od konvencionalnog trajanja čela.

j) Trajna struja odvodnika (*continuous current of an arrester*):
To je struja koja teče kroz odvodnik, kada je on pod trajnim radnim naponom. Trajna struja sastoji se od aktivne i kapacitivne komponente, a može da se mijenja sa temperaturom i djelovanjem rasipnog kapaciteta i spoljašnje prljavštine. Trajna struja ispitivanog uzorka ne mora biti ista kao trajna struja kompletnog odvodnika.

k) Preostali napon odvodnika U_{res} (*residual voltage of an arrester*):
Tjemena vrijednost napona koji se javlja na priključcima odvodnika u toku proticanja struje odvođenja.

l) Zaštitna karakteristika odvodnika (*protective characteristics of an arrester*):

Kombinacija sljedećih karakteristika:

- preostalog napona za strmu udarnu struju,
- karakteristika preostalog napona u funkciji struje odvođenja za atmosferske udarne struje,
- preostalog napona za sklopne udarne struje.

Atmosferski zaštitni udarni nivo odvodnika je najviši preostali napon za nazivnu struju odvođenja. Sklopni udarni zaštitni nivo odvodnika je najviši preostali napon pri utvrđenim sklopnim udarnim strujama.

Standardne vrijednosti nazivnih struja odvođenja za ZnO odvodnike prenapona su date u tabeli 4.2.

20	10	5	2,5	1,5
----	----	---	-----	-----

Tabela 4.2. Standardne vrijednosti nazivnih struja odvođenja (kA)

4.4 TERMIČKA STABILNOST ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Kroz nelinearne otpornike ZnO odvodnika prenapona pri nominalnom radnom režimu stalno protiče mala struja koja izaziva gubitke na odvodniku koji se pretvaraju u toplotu. Zbog toga se odvodnik zagrijava pa je potrebno da se sa odvodnika toplota odvede u okolni prostor. Toplota koja se razvija u unutrašnjosti odvodnika se predaje izolacionom kućištu, a sa kućišta toplota se odvede u okolni prostor. Osnovni uslov toplotne stabilnosti odvodnika je uspostavljanje ravnoteže između generisane toplote i odvedene toplote u okolni prostor. Porast temperature usljed narušavanja toplotne stabilnosti odvodnika je temperaturni pobjeg. Na slici 4.7. je prikazano zagrijavanje i hlađenje ZnO odvodnika pri trajnom radnom naponu (U_c). Odvedena količina toplote sa odvodnika približno linearno raste sa temperaturom:

$$Q = KS(T - T_0)$$

gdje su:

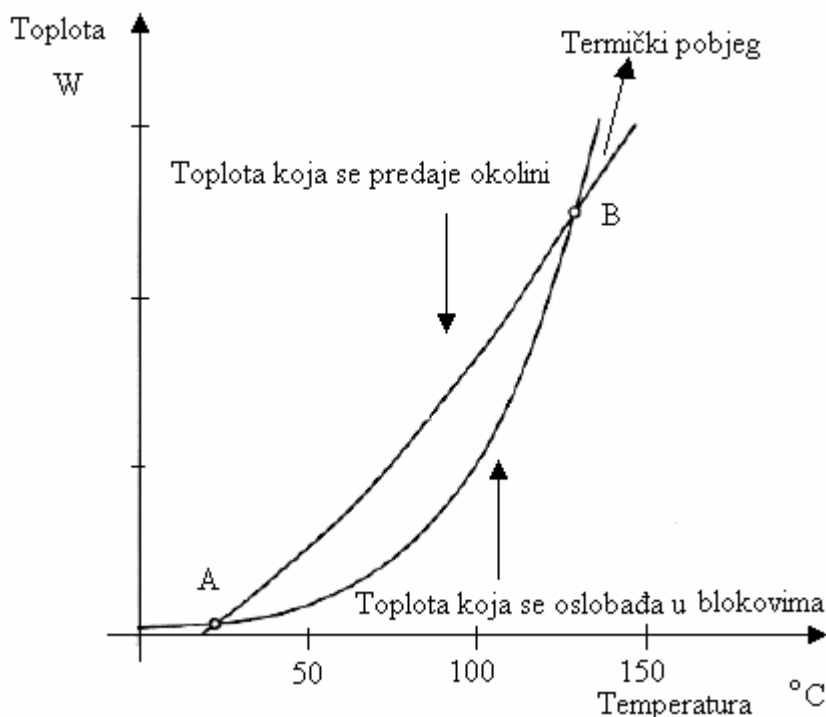
Q – količina toplote koja se odvodi hlađenjem (J),

K – koeficijent odvođenja toplote ($J/m^2, ^\circ C$),

S – površina hlađenja (m^2),

T – temperatura odvodnika ($^\circ C$),

T_0 – temperatura okoline ($^\circ C$).



Slika 4.7. Termička stabilnost blokova

Na dijagramu sa slike 4.7. tačka A predstavlja tačku stabilne toplotne ravnoteže, dok tačka B predstavlja kritičnu tačku. U tački A sa malim porastom temperature blokova raste količina odate toplote brže od količine toplote koja se generiše u bloku i odvodnik se hladi. U tački B sa porastom temperature brže se povećava količina toplote koja se oslobađa u blokovima od toplote koja se odvodi u okolinu, pa nastaje temperaturni pobjeg. Termički pobjeg je pojava koja traje određeno vrijeme. Pri izboru odvodnika prenapona najvažniji parametar je trajni radni napon. Uz odgovarajuće dimenzionisanje prilikom projektovanja moguće je podići

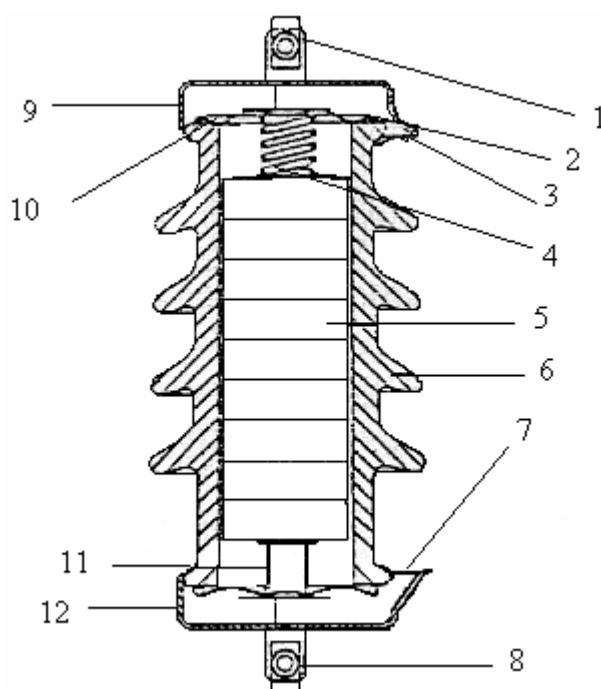
kritičnu tačku toliko da ona ne može biti dostignuta niti pri najvećem prenaponu koji se može pojaviti.

4.5. DODATNA OPREMA ODVODNIKA PRENAPONA

U dodatnu opremu spadaju:

- Kućište za smještaj odvodnika,
- Sistem zaptivanja i opruga za postizanje kontaktnog pritiska,
- Spoljašnje elektrode u obliku prstenova za poboljšanje raspodjele napona kod odvodnika prenapona za visoke napone,
- Sigurnosna membrana nadpritiska unutar kućišta,
- Pribor za spajanje sa faznim provodnikom i uzemljenjem,
- Brojač pražnjenja (nije obavezan dio odvodnika).

Na slici 4.8. je prikazan kompletan sklop ZnO odvodnika prenapona u presjeku.



Slika 4.8. Presjek potpunog srednjenaponskog odvodnika prenapona

Oznake na slici 4.8. su sljedeće:

- 1 - gornja stezaljka za vezu sa faznim provodnikom,
- 2 - sigurnosna membrana,
- 3 - otvor za ispuštanje vrelih gasova ,
- 4 - opruga za postizanje kontaktnog pritiska između blokova otpornika i provodnih dijelova,
- 5 - nelinearni otpornici od ZnO,
- 6 - porcelansko kućište,
- 7 - otvor za ispuštanje vrelih gasova u slučaju pojave električnog luka,
- 8 - donja stezaljka za vezu sa uzemljenjem,
- 9 - gornja klapna,
- 10 - zaptivka između membrane i kućišta,
- 11 - distantni cilindar od provodnog materijala
- 12 - donja kapa.

Sigurnosna membrana ima zadatak da u slučaju pojave nadpritiska u kućištu ispusti višak vrelih gasova kroz za to predviđen otvor. Vreli gasovi ispušteni kroz gornji i donji otvor odvodnika obrazuju luk sa vanjske strane odvodnika, i on je bezopasan.

Prsten za raspodjelu potencijala ima zadatak da načini raspodjelu potencijala ravnomjernu i da se naprave elektrode za regulaciju raspodjele napona sa vanjske strane odvodnika prenapona.

Brojač pražnjenja je uređaj koji se vezuje između odvodnika prenapona i uzemljenja, a ima zadatak da registruje svako provođenje udarne struje kroz odvodnik. Brojač pražnjenja ne mora da se ugrađuje, mada je njegova primjena značajna iz dva razloga:

- Može se na osnovu očitavanja stanja brojača utvrditi koliko je štice mreža izložena prenaponima,
- Daje informaciju koliko je puta odvodnik prenapona bio napregnut odvođenjem struje.

4.6. IZBOR ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Izbor ZnO odvodnika prenapona se vrši u tri koraka:

1. Određivanje parametara sistema
2. Provjera nenormalnih uslova rada
3. Izbor naznačenog napona

4.6.1. Određivanje parametara sistema

Najvažniji parametar sistema je maksimalni radni napon U_c , koji je viši od (5÷10)% od naznačenog napona sistema. Ovaj napon je efektivna linijska vrijednost napona. Drugi važan faktor je visina i trajanje privremenog prenapona U_t . Ovaj prenapon se najčešće određuje kao prenapon na neoštećenom faznom provodniku pri zemljospoju u mreži. Trajanje prenapona je od velike važnosti, što nije bio slučaj kod SiC odvodnika prenapona.

4.6.2. Provjera nenormalnih uslova rada

Ponekad se u sistemu mogu pojaviti slučajevi u kojima se u uzemljenom sistemu na nekim mjestima mogu pojaviti viši naponi na neoštećenim faznim provodnicima od očekivanih, što čini ovaj sistem neefikasno uzemljenim. Ako postoje uslovi za istovremeni nastanak i privremenih prenapona usljed zemljospoja i ispada opterećenja, treba uzeti u obzir i ovakav slučaj.

4.6.3. Izbor naznačenog napona

Naznačeni napon se određuje na dva načina:

- Na osnovu trajnog radnog napona U_c , tj. preko obrasca $U_c = \frac{U_m}{\sqrt{3}}$
- Na osnovu privremenog prenapona pri zemljospoju $U_t = K_f U_c$, gdje je K_f faktor zemljospoja, koji se usvaja za direktno uzemljene sisteme da je maksimalno 1,4; a za izolovane sisteme 1,73.

Naznačeni napon na bazi trajnog radnog napona određuje se iz izraza:

$$U_{Ro} = \frac{U_c}{K_o}$$

gdje je:

K_o – faktor izrade koji daje proizvođač. Za odvodnike koje proizvodi ASEA $K_o = 0,8$.

Naznačeni napon na bazi privremenog prenapona se određuje iz izraza:

$$U_{Rt} = \frac{U_t}{K_t}$$

gdje je:

K_t – koeficijent koji uvažava sposobnost odvodnika da podnosi privremene prenapone.

Finalni izbor odvodnika se vrši na bazi najvišeg naznačenog napona odvodnika između U_{Ro} i U_{Rt} . Značajno u izboru ZnO odvodnika prenapona je poznavanje mjesta ugradnje sa gledišta zagađenosti atmosfere.

4.7. ISPITIVANJE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Propisi predviđaju određena ispitivanja koje odvodnik prenapona mora da prođe prije nego što uđe u upotrebu. Postoje sljedeća tri tipa ispitivanja odvodnika prenapona:

- a) Tipska ispitivanja
- b) Komadna ispitivanja
- c) Prijemna ispitivanja

Za ZnO odvodnike prenapona se zahtijevaju sljedeća tipska ispitivanja:

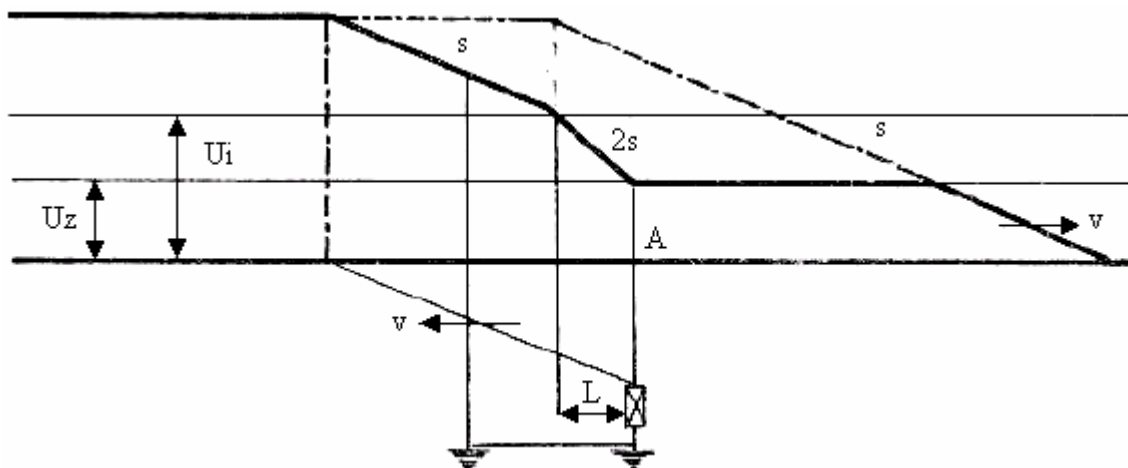
- Određivanje preostalog napona odvodnika
- Ispitivanje podnosivim udarnim strujama
- Ispitivanje u radnim uslovima
- Ispitivanje toplotne stabilnosti
- Ispitivanje toplotnog odziva odvodnika
- Ispitivanje u uslovima vještačke zagađenosti
- Ispitivanje uređaja za ograničavanje pritiska
- Ispitivanje uređaja za odvajanje odvodnika

Minimalna komadna ispitivanja koja se traže od ZnO odvodnika prenapona su ispitivanje preostalog napona pri maloj struji.

Redovno ispitivanje, radi provjere osnovnih zahtjeva, teško je izvodljivo na terenu. U obzir dolazi samo provjera struje odvođenja pri naponu 50 Hz nominalne vrijednosti mreže. Veći naponi bi izazvali trajna oštećenja odvodnika.

4.8. ZAŠTITNA ZONA ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Odvodnik prenapon ograničava prenapone na iznos preostalog napona odvodnika samo na mjestu ugradnje odvodnika, dok sa porastom udaljenosti od odvodnika raste i iznos napona. Zaštitna zona odvodnika proteže se na dio voda ispred i iza odvodnika prenapona. Udaljenost L od odvodnika na kojoj prenapon na šticeenom objektu dostiže vrijednost izolacionog nivoa (za atmosferske ili sklopne prenapone) naziva se zaštitnom zonom. Na slici 4.9. je predstavljena zaštitna zona odvodnika prenapona.



Slika 4.9. Zaštitna zona odvodnika prenapona

Na slici 4.9. pretpostavljeno je da je u tački A postavljen odvodnik prenapona čiji je zaštitni nivo U_z , pa će se tako prolazni talas prostirati dalje u desno. Za onaj dio upadnog naponskog talasa koji je iznad zaštitnog nivoa U_z , odvodnik predstavlja kratak spoj, pa se tako taj dio naponskog talasa reflektuje sa suprotnim predznakom, ili se može zamisliti da je na tom mjestu nastao izvor talasa, koji se prostire na obje strane i s desne strane briše sve što je iznad U_z . Lijevo od odvodnika uspostavlja se napon sa dvostrukom strminom $2s$. Važno je znati da odvodnik treba biti što bliže uređaju kojeg štiti. To znači da priključni vodovi od stezaljki odvodnika prenapona do voda pod naponom i do uzemljivača moraju biti što kraći, a otpor širenja uzemljivača što je moguće manji. Zaštitna zona ili najveća udaljenost L_{\max} odvodnika od štice uređaja se određuje iz izraza:

$$L_{\max} = \frac{U_i - (U_z + U_{\text{dod}})}{2s} v \quad [m]$$

gdje je:

v – brzina kretanja udarnog talasa po vodu ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$),

U_i – nazivni podnosivi atmosferski udarni napon za izolacioni nivo opreme koja se štiti (kV),

U_z – zaštitni nivo odvodnika (kV),

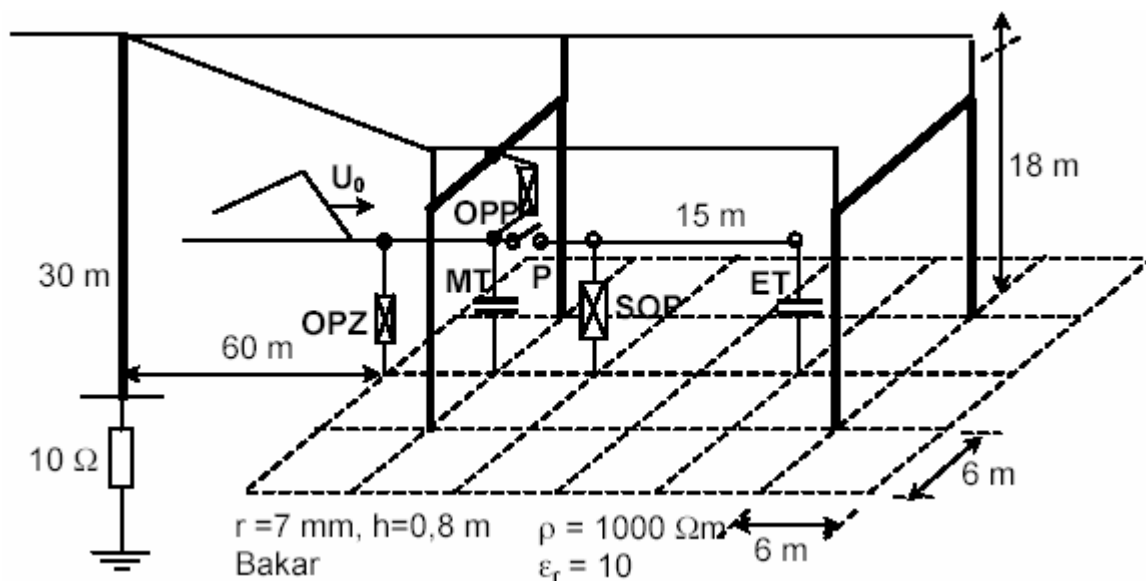
U_{dod} – dodatni induktivni pad napona na priključnim vodovima od stezaljki odvodnika do voda pod naponom i do uzemljivača (kV),

s – strmina čela udarnog talasa ($\text{kV}/\mu\text{s}$).

4.8.1. Zaštita visokonaponskih postrojenja ZnO odvodnicima prenapona

Prenaponska zaštita visokonaponskih postrojenja ostvaruje se najčešće tako da se u neposrednoj blizini energetskog transformatora ugradi odvodnik prenapona, čiji je zadatak da, pored energetskog transformatora, štiti i ostalu opremu u postrojenju. U slučajevima kada je prekidač u vodnom polju postrojenja otvoren ili se nalazi u procesu prekidanja, oprema u vodnim poljima nije zaštićena. Oprema vodnih polja visokonaponskih postrojenja može se kvalitetno zaštititi odvodnicima prenapona ugrađenim u vodnim poljima. Odvodnici prenapona koji su se koristili za ovu svrhu bili su najčešće sa porcelanskim kućištem, a imali su istu klasu odnosno energetsku sposobnost kao i odvodnici koji su služili za zaštitu energetskih transformatora. Ovi odvodnici imali su iste zahtjeve za načinom ugradnje i potrebnim prostorom u postrojenju kao i odvodnici uz transformatore, što je bitno poskupljivalo ovakvu vrstu zaštite. Pored toga događale su se eksplozije odvodnika, pri čemu je redovno dolazilo i do oštećenja opreme u visokonaponskom postrojenju. Pojavom ZnO odvodnika sa kućištem

od silikonske gume otvorena je mogućnost sasvim drugačijem pristupu prenaponske zaštite visokonaponskih postrojenja. Ovi odvodnici su znatno lakši od odgovarajućih odvodnika sa porcelanskim kućištem, pa se mogu ugrađivati direktno na ulaznim portalima postrojenja. Pored toga, ne postoji mogućnost prodora vlage unutar odvodnika, što je bio jedan od glavnih nedostataka odvodnika sa porcelanskim kućištem. Ovi odvodnici imaju puno bolje prorađne karakteristike, manje su osjetljivi na vanjsko zagađenje i ne dolazi do njihovog rasprskavanja u slučaju eventualnog otkaza, te ne predstavljaju opasnost za ostalu opremu. Analizirana su dva slučaja ugradnje odvodnika prenapona u vodnim poljima postrojenja kao na slici 4.10.



Slika 4.10. Odvodnici prenapona u vodnom polju postrojenja 110 kV ugrađeni na nivou zemlje **OPZ** i na ulaznim portalima **OPP**

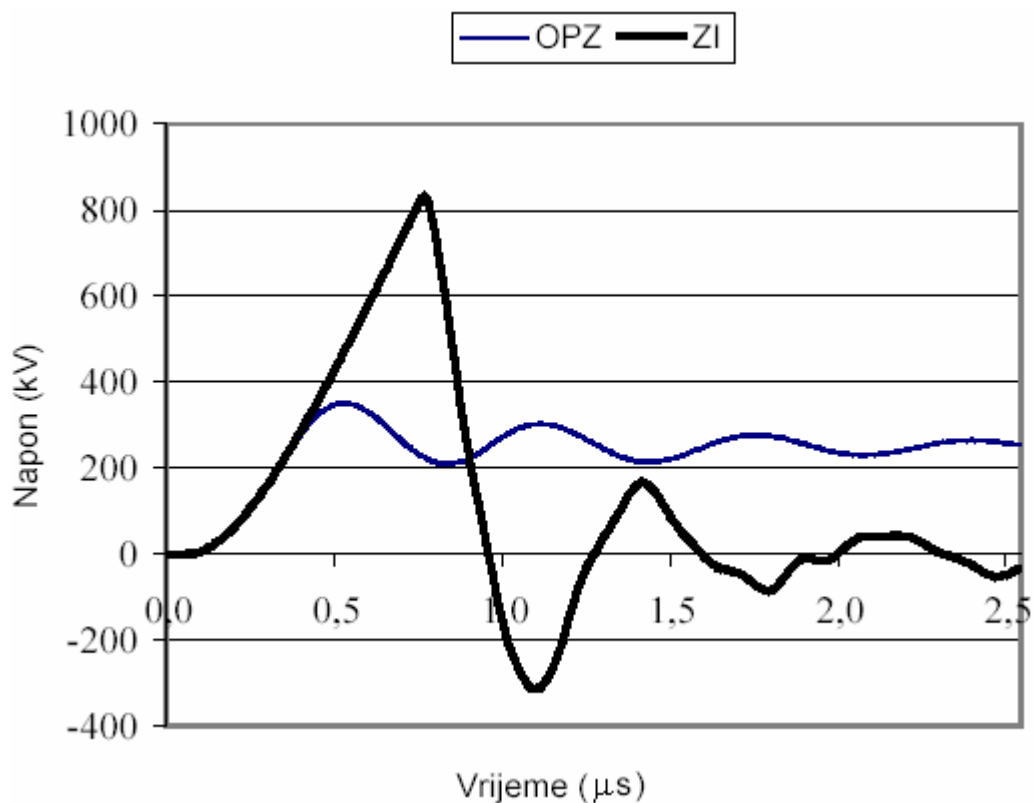
Oznake na slici 4.10. su:

ET – energetski transformator

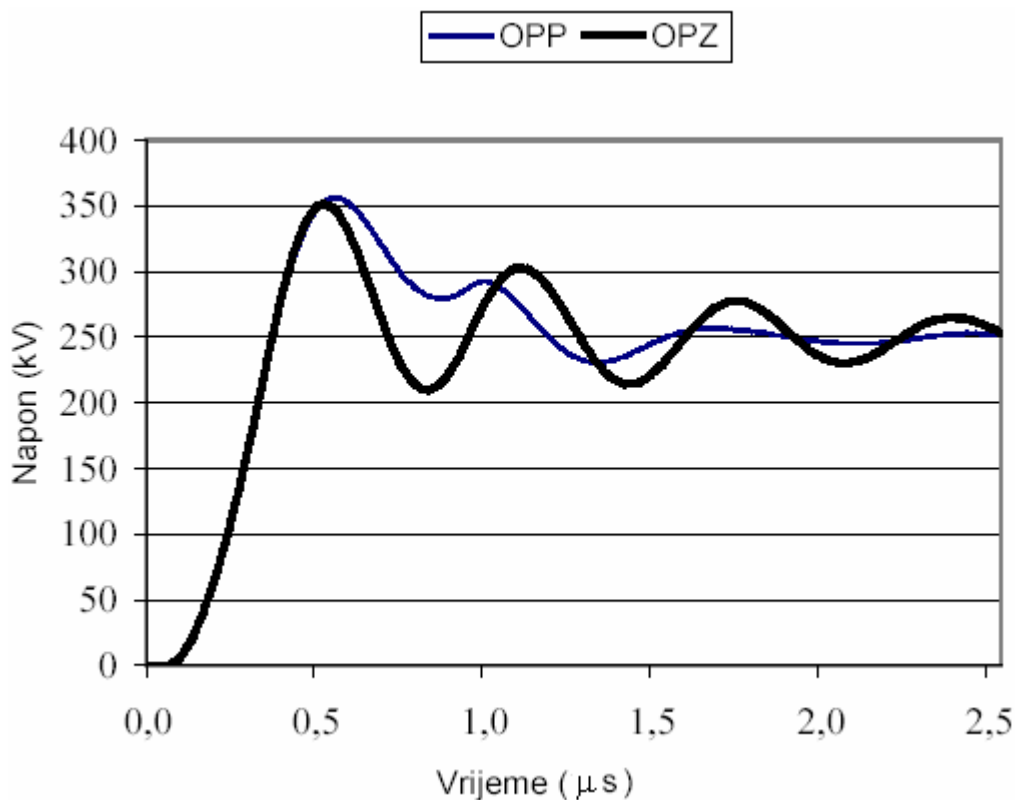
MT – mjerni transformator

P – prekidač

Za slučaj ugradnje odvodnika na nivou zemlje (**OPZ**) proračunati napon na mjernom transformatoru dat je na slici 4.11. Iz oblika prenapona na slici 4.11. primjećuje se značajno povećanje prenaponske zaštite postrojenja primjenom metal oksidnih odvodnika prenapona. Odvodnik prenapona reaguje pri znatno nižem naponu od napona reagovanja zaštitnog iskrišta, ne pojavljuju se opasni strmi naponski talasi, pa nema preskoka na ulazu u postrojenje. Za slučaj ugradnje odvodnika na ulaznim portalima **OPP** oblik prenapona na mjernom transformatoru je dat na slici 4.12.



Slika 4.11. Oblik prenapona na mjernom transformatoru pri primjeni zaštitnog iskrišta **ZI** i odvodnika prenapona u vodnom polju postrojenja **OPZ**



Slika 4.12. Oblik prenapona na mjernom transformatoru pri primjeni odvodnika prenapona u vodnim poljima postrojenja

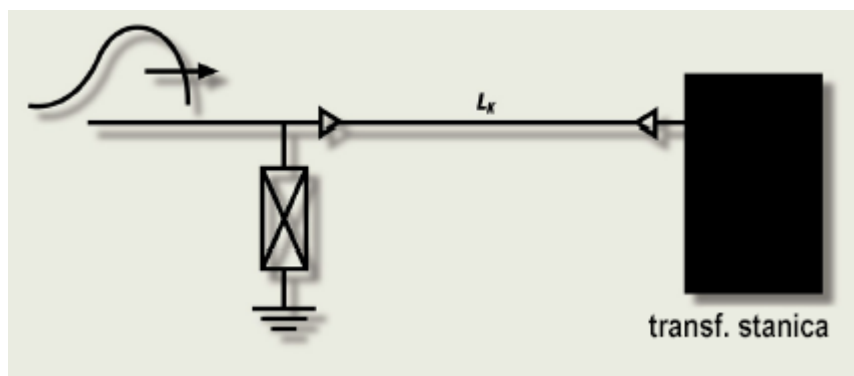
Na slici 4.12. je dat i oblik prenapona na mjernom transformatoru za slučaj ugradnje odvodnika prenapona na nivou zemlje **OPZ**. Na osnovu rezultata sa slike 4.12. može se zaključiti da nema bitnih razlika u kvalitetu prenaponske zaštite u slučajevima ugradnje odvodnika prenapona na nivou zemlje ili ulaznim portalima. Ugradnja odvodnika prenapona na ulaznim portalima predstavlja vrlo prihvatljivo rješenje zaštite opreme u vodnim poljima postrojenja. Nije potrebno posebno mjesto za odvodnike unutar postrojenja, čime se štedi na potrebnom prostoru. Isto tako, nema potrebe za posebnom konstrukcijom za ugradnju odvodnika.

4.8.2. Zaštita distributivnih mreža ZnO odvodnicima prenapona

Jedna od definicije koordinacije izolacije kaže da je to postupak dovođenja u odgovarajući odnos dielektrične čvrstoće izolacije električne opreme sa očekivanim prenaponom i karakteristikama prenaponske zaštite. Obično se koordinacija izolacije dijeli u onu za mreže i postrojenja. U koordinaciji izolacije distributivnih mreža značajnu ulogu imaju metal oksidni odvodnici prenapona. Za distributivne mreže obično se daju jednostavene formule i postupci, koji se koriste u postupku koordinacije izolacije uz pomoć odvodnika prenapona.

4.8.2.1. Mjesto postavljanja odvodnika kod kabla u spoju sa nadzemnim vodom

U mnogim slučajevima, neophodno je zaštititi odvodnicima oba kraja jedne dionice kabla. Za vrlo kratke dionice, biće dovoljno zaštititi kabl samo na jednom kraju, kao na slici 4.13.

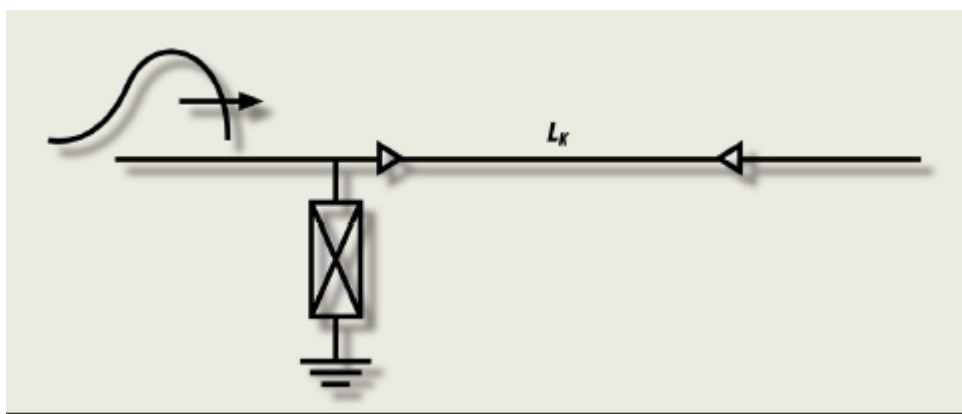


Slika 4.13. Priključak nadzemnog voda na transformatorsku stanicu preko kratke dionice kabla

Kabl spojen između nadzemnog voda i transformatorske stanice, izložen je riziku od atmosferskih prenapona koji u ovom slučaju dolaze nadzemnim vodom. Zbog toga, odvodnici prenapona moraju biti postavljeni na mjestu prelaza nadzemnog voda u kabl. Ugradnja drugog odvodnika (u transformatorskoj stanici) nije potrebna u koliko dužina kabla L_k ne prelazi vrijednost iz tabele 4.3. U suprotnom slučaju, oprema unutar transformatorske stanice spojena na ovu kratku dionicu kabla, biće izložena riziku refleksije talasa na kraju. Ova pojava, zahtjeva ugradnju odvodnika na kraju dionice kabla, neophodnim. Za optimalnu zaštitu kablovskih završetaka i za smanjenje fenomena putujućih talasa, odvodnici moraju biti ugrađeni što je bliže moguće kablovskim završetcima. Svi spojevi odvodnika na kabl moraju biti što je moguće kraći (uključujući i spoj sa uzemljenjem), radi održavanja niskih napona u cjelokupnoj konfiguraciji mreže. Električna zaštita kabla (ekran) u tom slučaju mora biti spojena na uzemljenje odvodnika.

U_m (kV)	L_k (m)			
	Drveni stubovi		Uzemljene konzole	
Z (Ω)	30	60	30	60
12	40	30	40	32
24	28	23	28	24
36	22	20	22	20

Tabela 4.3. Maksimalna dužina kabla L_k između transformatorke stanice i nadzemnog voda štićena samo sa jedne strane

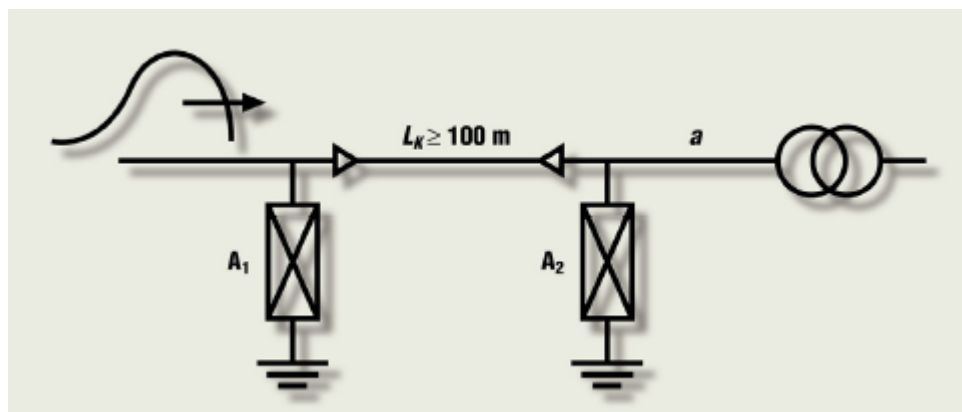


Slika 4.14. Kombinacija nadzemni vod, kabl, nadzemni vod

Za slučaj kombinacije kao na slici 4.14., ako je dužina kabla veća od 50 m obavezno je postavljanje odvodnika sa oba kraja kabla.

4.8.2.2. Mjesto postavljanja odvodnika kod transformatora na kraju priključenog kabla

U koliko dužina kabla L_k prelazi vrijednost datu u tabeli 4.3. potreban je i drugi odvodnik. Postavlja se pitanje u kojoj mjeri će drugi odvodnik A_2 zaštititi nizvodno postavljen transformator. U primjeru na slici 4.15. transformator je spojen na nadzemni vod, preko kabla dužine $L_k \geq 100$ m.



Slika 4.15. Drugi odvodnik postavljen između kraja kabla i transformatora

Jedan odvodnik je potreban na strani prelaza nadzemnog voda u kabl, a drugi na kraju kabla. Odvodnik A_1 pruža zaštitu od strane voda, a odvodnik A_2 ograničava prenapone nastale refleksijom putujućeg talasa na kraju kabla.

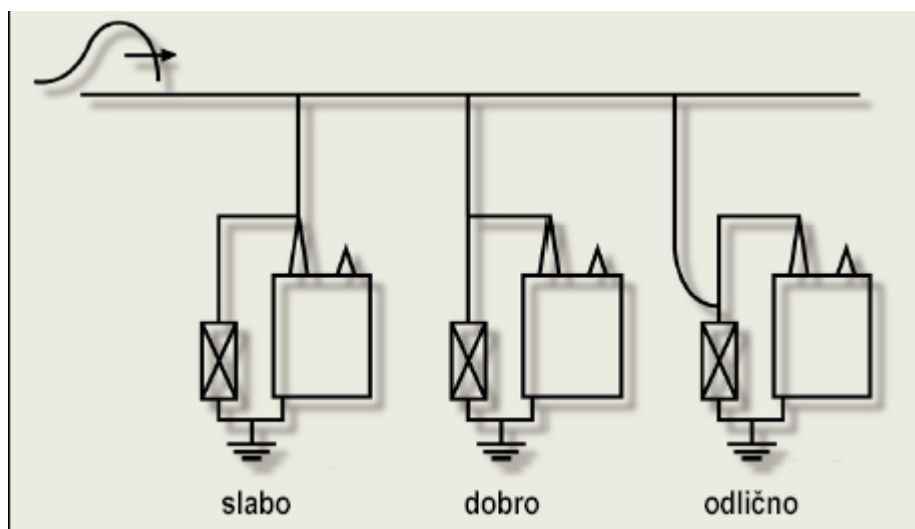
U_m (kV)	a (m)			
	Drveni stubovi		Uzemljene konzole	
Z (Ω)	30	60	30	60
12	20	14	20	14
24	19	12	19	12
36	16	11	20	11

Tabela 4.4. Maksimalna udaljenost a između kraja kabla i transformatora kada je drugi odvodnik postavljen direktno na kraju kabla

U ovom slučaju, pridržavajući se uslova da udaljenost a ne pređe vrijednosti iz tabele 4.5. transformator će biti odgovarajuće zaštićen odvodnikom A_2 .

4.8.3. Zaštita transformatora ZnO odvodnicima prenapona

Na slici 4.16. su prikazana tri načina priključenja odvodnika namjenjenih za zaštitu transformatora. Najbolji je treći način iako bi se i on mogao poboljšati smanjenjem udaljenosti a . (a udaljenost kao na slici 4.15.).



Slika 4.16. Vrednovanje i način priključivanja odvodnika i štice objekta na mrežu

Atmosferski prenaponi koji mogu da ugroze izolaciju distributivnih transformatora dijele se na:

- Prenapone nastale direktnim udarom u vod srednjeg napona ili u objekte u njegovoj neposrednoj blizini,
- Prenapone izazvane direktnim ili indirektnim atmosferskim pražnjenjem u vod srednjeg napona, koji se prenose kroz distributivni transformator na stranu voda niskog napona,
- Indukovane prenapone izazvane na vodu niskog napona usljed pražnjenja u zemlju u blizini voda,

- Prenapone usljed direktnih udara u vod niskog napona ili u njegovoj blizini.

Zaštita distributivnih transformatorskih stanica od prenapona atmosferskog porijekla je predmet proučavanja mnogih elektrodistributivnih organizacija širom svijeta. Aktualnost ove problematike je danas naročito izražena s obzirom na osjetljivost sve prisutnije elektronske opreme na atmosferske prenapone. U Australiji je od 1960. godine započeto istraživanje ugroženosti distributivnih transformatora od prenapona. Rezultati teoretskih analiza zajedno sa eksperimentalnim istraživanjima u laboratoriji su upoređeni sa rezultatima dobijenim na osnovu pogonskih događaja vezanih za distributivne transformatore i odvodnike prenapona. U Australiji je zaštita distributivnih transformatora od atmosferskih prenapona bila bazirana na sljedećem:

- Odvodnik prenapona je postavljen samo na visokonaponskoj strani distributivnog transformatora,
- Rastojanje između mjesta priključivanja odvodnika prenapona i visokonaponskih priključaka distributivnog transformatora je iznosio 3 do 5 m.

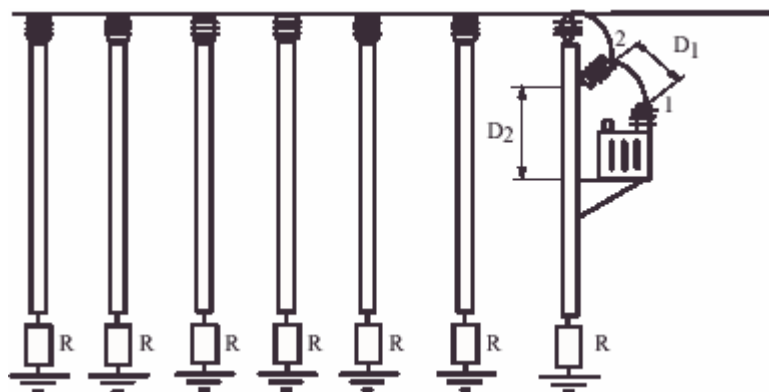
Zaključci u vezi najvažnijih uzroka kvarova distributivnih transformatora usljed atmosferskih prenapona ukazivali su na nedostatke pomenutih mjera zaštite. Odsustvo prenaponske zaštite na niženaponskoj strani distributivnih transformatora, kao i relativno velika udaljenost između mjesta priključka odvodnika prenapona i priključka distributivnih transformatora doprinijeli su značajnom procentu kvarova distributivnih transformatora usljed prenapona atmosferskog porijekla. Iz navedenih zaključaka proizašle su preporuke o zaštiti distributivnih transformatora od atmosferskih prenapona koje sadržavaju sljedeće tri mjere:

- Ugradnja odvodnika prenapona na višenaponskoj i niženaponskoj strani distributivnog transformatora,
- Montaža odvodnika prenapona što bliže priključcima distributivnog transformatora (unutar rastojanja od 0,6 m)
- Otpornost uzemljenja treba da ima vrijednost od 10 Ω ili niže.

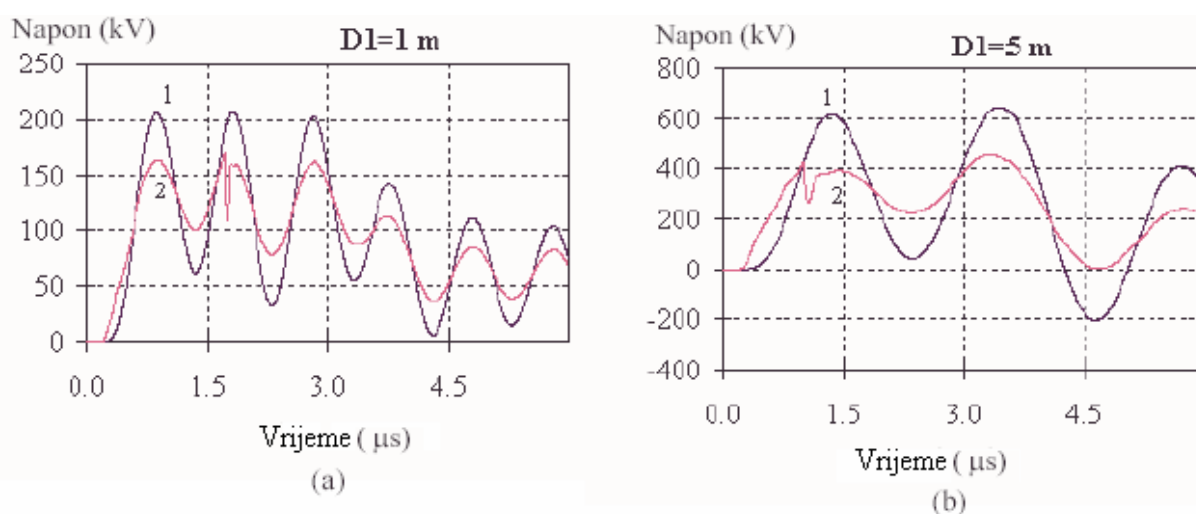
Pod preporučenom zaštitom se podrazumjeva postojanje odvodnika prenapona na obje strane distributivnog transformatora, unutar 0,6 m od njegovih priključaka. Drugi tipovi zaštite predstavljaju uglavnom rješenja samo sa odvodnikom prenapona na višenaponskoj strani na rastojanju od 3 m u odnosu na priključke transformatora. Osnovna dva uzroka redukcije broja kvarova izolacije distributivnih transformatora su:

- a) ugradnja odvodnika na niženaponskoj strani,
- b) nova lokacija odvodnika prenapona na višenaponskoj strani.

Ugroženost izolacije distributivnih transformatora od prenapona vrlo strmog čela, koji su simulirani u laboratorijama inostranih distributivnih organizacija, ukazuju na potrebu što je moguće bliže montaže odvodnika prenapona u odnosu na priključke distributivnih transformatora. Primjena odvodnika prenapona na niženaponskoj strani distributivnih transformatora predstavlja glavni efekat u smanjenju broja kvarova izolacije distributivnih transformatora usljed atmosferskih pražnjenja. Na slici 4.17. je prikazana ekvivalentna šema za procjenu broja proboja izolacije transformatora. Ova šema obuhvata šest raspona ispred analiziranog transformatora. Najvažniji parametar ekvivalentne šeme su dužina veze D_1 između priključka odvodnika prenapona 2 i provodnog izolatora transformatora 1, kao i dužina veze D_2 između priključka za uzemljenje odvodnika prenapona i priključka za uzemljenje na kućištu transformatora. Ostali parametri ekvivalentne šeme su dužina raspona 100 m, visina stuba 10 m i otpornost uzemljenja stuba 10 Ω . Preskočni napon izolacije definisan je V-t krivom. Talasni oblici napona prikazani su na slici 4.18.a ($D_1 = 1$ m) i slici 4.18.b ($D_1 = 5$ m).

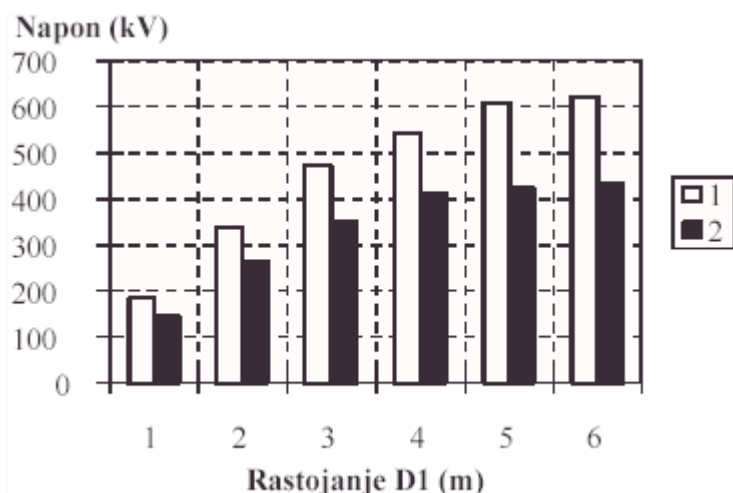


Slika 4.17. Ekvivalentna šema za procjenu broja proboja izolacije stubnih transformatora srednjeg napona



Slika 4.18. Talasni oblici na priključcima transformatora (kriva 1) i odvodnika prenapona (kriva 2); a) $D_1=1$ m, b) $D_2=5$ m

Dužina veze D_1 je varirana od 1 m do 6 m, dok je pretpostavljeno da je veza D_2 za 1 m duža od veze D_1 s obzirom na visinu kućišta transformatora. Na slici 4.19. prikazane su maksimalne vrijednosti napona u tačkama 1 i 2 za sistem nazivnog napona 10 kV. Analiza je urađena za amplitudu struje atmosferskog pražnjenja od 121 kA i strminu 43 kA/ μ s. Ovi parametri atmosferskog pražnjenja mogu da budu prevaziđeni sa vjerovatnoćom od 2 %. Na osnovu prikazanih napona na slici 4.18. može se zaključiti da njihova amplituda izrazito zavisi od dužina veza D_1 i D_2 . Za sisteme srednjeg napona dovoljno je analizirati atmosferska pražnjenja u prva četiri raspona ispred transformatora. Atmosferska pražnjenja u udaljene raspone od transformatora nisu opasna po izolaciju transformatora, ako impedanse uzemljenja stubova nisu velike.



Slika 4.19. Maksimalne vrijednosti napona na priključcima transformatora (1) i odvodnika prenapona (2) za različite dužine veze D_1

4.8.3.1. Parametri pouzdanosti energetskih transformatora pri atmosferskom pražnjenju

Očekivani godišnji broj proboja N_p izolacije i prosječno vrijeme do proboja T_p visokonaponskog namotaja transformatora su definisani sljedećim izrazima:

$$N_p = \sum_{m=1}^v N_{p,m}$$

$$T_p = \frac{1}{N_p} = \frac{1}{\sum_{m=1}^v N_{p,m}}$$

gdje su:

$N_{p,m}$ – očekivani godišnji broj proboja izolacije visokonaponskog namotaja transformatora pri dolasku atmosferskih prenapona m-tim vodom u transformatorsku stanicu,

v – broj vodova kojim atmosferski prenaponi dolaze u transformatorsku stanicu.

Očekivani godišnji broj proboja izolacije visokonaponskog namotaja transformatora pri dolasku talasa m-tim vodom je definisan sljedećim izrazom:

$$N_{p,m} = N_g \sum_i (S_{m,f,i} R_{m,f,i} + S_{m,t,i} R_{m,t,i})$$

gdje su:

N_g – godišnji broj atmosferskih pražnjenja na 1 km^2 ,

$S_{m,f,i}$ – ekvivalentna prihvatna površina faznih provodnika i-tog raspona m-tog voda,

$S_{m,t,i}$ – ekvivalentna prihvatna površina sa obe strane i-tog raspona m-tog voda na kojoj udari groma generišu indukovane prenapone na vodu,

$R_{m,f,i}$ – rizik proboja visokonaponskog namotaja transformatora pri atmosferskom pražnjenju u fazne provodnike i-tog raspona m-tog voda,

$R_{m,t,i}$ – rizik proboja izolacije visokonaponskog namotaja transformatora pri atmosferskom pražnjenju u okolini i-tog raspona m-tog voda.

Rizik proboja izolacije visokonaponskog namotaja transformatora pri atmosferskom pražnjenju u i-ti raspon je odnos broja atmosferskih pražnjenja na i-tom rasponu koji dovode do proboja i ukupnog broja primjenjenih atmosferskih pražnjenja na istom rasponu. Smatra se da je pouzdanost transformatora visokog napona i velikih snaga pri djelovanju prenapona zadovoljavajuća kada je njihov parametar – prosječno vrijeme do proboja $T_p \geq 600$ godina. Za distributivne transformatore ovaj parametar pouzdanosti mogao bi da bude prihvatljiv ako iznosi $T_p \geq 200$ godina. Tada se može tvrditi sa pouzdanošću približno 85% da neće pri djelovanju prenapona doći do proboja izolacije transformatora u njegovom životnom vijeku $t_v = 30$ godina.

4.8.3.2. Usklađivanje karakteristika odvodnika prenapona s obzirom na energetska naprezanja usljed prenijetih prenapona

Odvodnici prenapona prazne energiju usljed atmosferskih i sklopnih prenapona na dijelu mreže kojem pripadaju na istom naponskom nivou. Ali u određenim slučajevima, može se desiti da odvodnici prenapona priključeni na niženaponskom nivou prazne energiju sa višenaponskog nivoa. Do toga dolazi kada odvodnik na niženaponskom nivou prazni sklopne prenapone prenijete kroz energetska transformator sa višenaponske strane. To predstavlja opasnost po odvodnik na niženaponskom nivou zbog mogućnosti pražnjenja energije veće od apsorbcione energije odvodnika na niženaponskom nivou. Ako na prenijete prenapone reaguje odvodnik prenapona na nižem naponskom nivou, onda će on ograničavati prenaponske talase i na primarnoj strani, tako da odvodnik prenapona na visokonaponskoj strani ne reaguje. Tako će cjelokupna energija prenaponskog talasa prazniti odvodnik prenapona sa niskonaponske strane. Iz ovog razloga je bitno usaglašavanje karakteristika odvodnika prenapona na različitim naponskim nivoima, tako da se onemogući pražnjenje energije sa višeg naponskog nivoa kroz one na nižem naponskom nivou. Zbog toga proizvođači ZnO odvodnika prenapona predlažu da naznačeni napon odvodnika na niženaponskoj strani bude za 3-5 % viši od naznačenog napona na višem naponskom nivou (naznačeni napon izražen je u p.u.). Tako se prihvata relacija za određivanje trajnog radnog napona odvodnika prenapona na nižem naponskom nivou:

$$U_{C_{NN}} \geq 1,04 U_{C_{VN}} N$$

gdje je:

$U_{C_{NN}}$ – trajni radni napon na NN strani,

$U_{C_{VN}}$ – trajni radni napon na VN strani,

N – prenosni odnos.

Energetske karakteristike ZnO odvodnika prenapona povezane su sa mogućnošću apsorpcije energije u nelinearnim blokovima bez hlađenja. Približan proračun energetskih naprezanja vršimo pomoću sljedećeg izraza:

$$E = 2 \frac{U_p - U_z}{Z} U_z T$$

gdje je:

E – energija koju prazni odvodnik,

$U_p = k U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ - vršna vrijednost prenapona,

U_z – preostali napon na sklopnu struju 1 kA ili zaštitni nivo odvodnika,

$T = \frac{l}{v}$ - vrijeme prostiranja talasa po dalekovodu ($l = 60 \text{ km}$, $v = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$, $T = 2 \cdot 10^{-4} \text{ s}$),

k – amplituda prenapona sklapanja.

4.9. MONTAŽA ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Svi tipovi metal oksidnih odvodnika prenapona su predviđeni za spoljašnju montažu. Mogu se slobodno montirati u područjima sa snijegom, lokvama ili vodom. Dozvoljena je horizontalna i vertikalna montaža. U slučajevima kada proizvođači konstrukciono ugrađuju ventile za oslobađanje od pritiska, prilikom montaže okrenuti ventile tako da se u slučaju unutrašnjeg kvara minimalno ošteti okolna oprema. Podizanje odvodnika 110 kV i 35 kV vršiti ili pomoću metalne kape sa priključkom ili hvatanjem užetom oko porcelana ispod donjeg priključka. Odvodnike 20 kV i 10 kV pažljivo ručno podizati. Prilikom spajanja cink-oksidnih odvodnika, voditi računa o šticejnoj zoni i da uzemljenje i postolje odvodnika prenapona moraju biti čvrsto uzemljeni na uzemljenje impedanse manje od 5Ω . Fazni priključci se montiraju tako da ne prouzrokuju stalno opterećenje koje bi izazvalo veći bazni moment od konstrukciono dozvoljenog. U slučajevima kada se, kao dodatna oprema ugrađuje brojač prorade u vodu za uzemljenje odvodnika, moraju se odvodnici prenapona postaviti na izolacione stubiće. Prilikom montaže, treba voditi računa da se ne ošteti izolacija izolacionih stubića i da se pravilno provodnik za uzemljenje odvoji od metalne konstrukcije portala.

4.10. PODACI ZA NARUDŽBU ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Svaka narudžba metal oksidnog odvodnika prenapona treba da sadrži sljedeće podatke:

- trajni radni napon,
- naznačeni napon,
- preostali napon za strme udarne struje,
- standardne vrijednosti nazivne struje odvođenja i preostali naponi,
- sklopne udarne struje i preostali naponi,
- struju kratkog spoja u mreži gdje se postavlja odvodnik prenapona,
- dužinu i oblik strujne staze kućišta odvodnika prenapona,
- dopunsku opremu:
 - vrsta montaže: postolje, konzola, vješanje (koji položaj) itd., naglasiti ako je potrebna izolaciona podloga radi priključenja brojača pražnjenja; za odvodnike na konzoli ukazati da li je konzola uzemljena ili ne,
 - orijentaciju montaže ako nije vertikalna,
 - uređaji za odvajanje provodnika za uzemljenje, ako se zahtijeva,
 - presjek provodnika za priključenje.

U koliko je zona gdje se ugrađuje odvodnik prenapona izrazito izložena atmosferskim pražnjenjima ili aerozagađena, to treba naglasiti u narudžbi.

4.11. ODRŽAVANJE ZnO ODVODNIKA PRENAPONA

Za ovu opremu nije potrebno posebno održavanje niti proizvođač predviđa neku periodičnost održavanja. U područjima sa velikim aerozagađenjem porcelan se održava na isti način kao i ostala oprema sa porcelanom. Dozvoljava se pranje pod naponom, uz predhodno konsultovanje sa proizvođačem, bez opasnosti za oštećenje unutrašnjih aktivnih dijelova. Pri tome treba voditi računa da oba priključka (fazni i za uzemljenje) budu čvrsto stegnuti.

5. ZAKLJUČAK

Primjena gromobrana sa izvorima jonizujućeg zračenja, tj. gromobrana koji na svome vrhu nose izvor jonizujućeg zračenja nije se pokazala efikasna u pogledu proširenja zaštitne zone gromobrana, na šta ukazuju najnoviji eksperimentalni rezultati.

Zaštitnu zonu zaštitnog užeta je najbolje odrediti eksperimentalnim putem ako za to postoji mogućnost, a ako ne onda se korite razni empirijski obrasci.

Iskrište ima ulogu sklopnog aparata koji uključuje kada napon pređe određenu vrijednost (napon reagovanja), a isključuje kada struja prolazi kroz nulu. Zaštita sa zaštitnim iskrištima je veoma jeftina, pouzdana i jednostavna. Iskrišta čine dopunsku prenaponsku zaštitu na vodovima. Nikada se ne postavljaju na prvi ili krajnji stub.

Cijevni odvodnici prenapona su uređaji za uspješno gašenje luka pri čemu se stvaraju gasovi od razorenog materijala od koga je načinjena cijev, pri čemu se povećava pritisak ili se daje vrtložno ili usmjereno kretanje gasova u cijevi, radi intenzivnijeg gašenja luka.

SiC odvodnici prenapona imaju napon reagovanja koji iznosi 4U (p.u.). Pri djelovanju prenapona SiC odvodnici imaju ulogu da smanje otpor i propuste veliku struju pražnjenja, a da pri tome zadrže preostali napon u granicama koje ne ugrožavaju opremu. Poslije prestanka prenapona SiC odvodnici prenapona trebaju da ograniče propratnu struju koja protiče pod dejstvom radnog napona, tako da se luk može ugasiti u prvoj sljedećoj nuli.

ZnO odvodnici prenapona za razliku od SiC odvodnika prenapona mogu da se vezuju paralelno u cilju povećanja energetskih mogućnosti.

Veoma važna prednost ZnO odvodnika prenapona je izražen koeficijent nelinearnosti.

ZnO odvodnici prenapona nemaju praga reagovanja, imaju svoju V-A karakteristiku i kada napon pređe preko koljena krive dolazi do provođenja struje.

Kod ZnO odvodnika prenapona postoji struja "curenja" usljed radnog napona i vrijednost ove struje je veoma mala, reda (250÷500) μ A.

Metal oksidni odvodnici prenapona ugrađeni u vodnim poljima postrojenja pružaju veoma kvalitetnu zaštitu opreme u vodnim poljima postrojenja. Pored toga, preuzimajući dio struje atmosferskog pražnjenja, doprinose poboljšanju sveukupne zaštite postrojenja. Zahvaljujući razvoju odvodnika prenapona sa kućištem od silikonske gume pojavila se mogućnost ugradnje odvodnika na ulaznim portalima postrojenja. Za ovaj način montaže nije potrebna posebna konstrukcija niti posebno mjesto za njihovu ugradnju.

Samo ispravan odvodnik prenapona uz predhodno poznavanje prilika u mreži, su garancija njegovog uspješnog rada te dobre koordinacije izolacije.

Mjesto i način ugradnje odvodnika prenapona su veoma bitni za ispravnu zaštitu pogonskog sredstva, na što projektanti i inženjeri mreža moraju obratiti više pažnje.

Relokacija odvodnika prenapona na višenaponskoj strani i ugradnja odvodnika prenapona na niženaponskoj strani distributivnih transformatora predstavljaju preporučene mjere zaštite od atmosferskih prenapona.

Odvodnici prenapona na stubu, postavljeni na ulazu u kablovsku završnicu voda koji ulazi u transformatorsku stanicu, su efikasno sredstvo za zaštitu transformatora samo pri dolasku indukovanih prenapona nadzemnim vodovima. Pri atmosferskim pražnjenjima direktno u fazne provodnike voda njihova efikasnost zaštite se bitno smanjuje.

Eventualni problem energetskog preopterećenja odvodnika prenapona na niženaponskom nivou je posebno izražen za slučaj zadržavanja klasičnih odvodnika na višem naponu, a montiranjem ZnO odvodnika prenapona na nižem naponu. U slučaju da je moguć prenos sklopne energije sa višeg na niži naponski nivo potrebno je napraviti takav izbor karakteristika da se obezbijedi reagovanje odvodnika prenapona na višem naponskom nivou.

6. PRILOG

Ovi odvodnici se, uglavnom iz komercijalnih razloga, proizvode sa manjom apsorpcionom moći (od 2,6 kJ/kV U_c do 4,9 kJ/kV U_c). Za manju apsorpcionu moć je manji i koeficijent privremenog prenapona k_{pp} pa ćemo izvršiti provjeru ovih odvodnika prenapona i ono što se razlikuje od odvodnika prenapona ugrađenih u trafo polju naznačiti.

U mreži 20 kV odvodnici prenapona se postavljaju na izlasku nadzemnog ili kablovskog voda iz transformatorske stanice 110/20 kV/kV, na prelasku kablovskog voda u nadzemni ili obrnuto i za zaštitu kablovskog izvoda. Za slučaj kombinacije nadzemni vod, kabl, nadzemni vod obavezno je za dužine kabla veće od 50 m postavljanje odvodnika prenapona sa oba kraja kabla.

1. Podaci o mreži 20 kV:

- maksimalni radni napon	$U_m=24$ kV
- učestanost	50 Hz
- faktor zemljospoja	$\approx 1,8$
- maksimalno trajanje zemljospoja	0,5 s
- struja kratkog spoja	14,5 kA
- karakteristična impedansa voda	$\approx 400 \Omega$
(za AlFe 50 mm ² je $Z_c=394 \Omega$, a za AlFe 95 mm ² je $Z_c=486\Omega$)	
- izolacioni nivo opreme koja se štiti:	
- atmosferski	125 kV
- sklopni	104 kV
- amplituda prenapona sklapanja	3,1 p.u.
- dužina dalekovoda	30 km
- koeficijent zaštite :	
- za atmosferske prenapone	1,4
- za sklopne prenapone	1,4

Mreža 20 kV je uzemljena preko metalnog otpornika 40 Ω , koji struju zemljospoja ograničava na 300 A i najduže za 0,5 s isključuje zemljospojna zaštita mjesto zemljospoja. Karakterističan primjenjeni provodnik u mreži je AlFe 95 mm², mada se koristi i AlFe 50 mm².

2. Izbor nazivnih vrijednosti

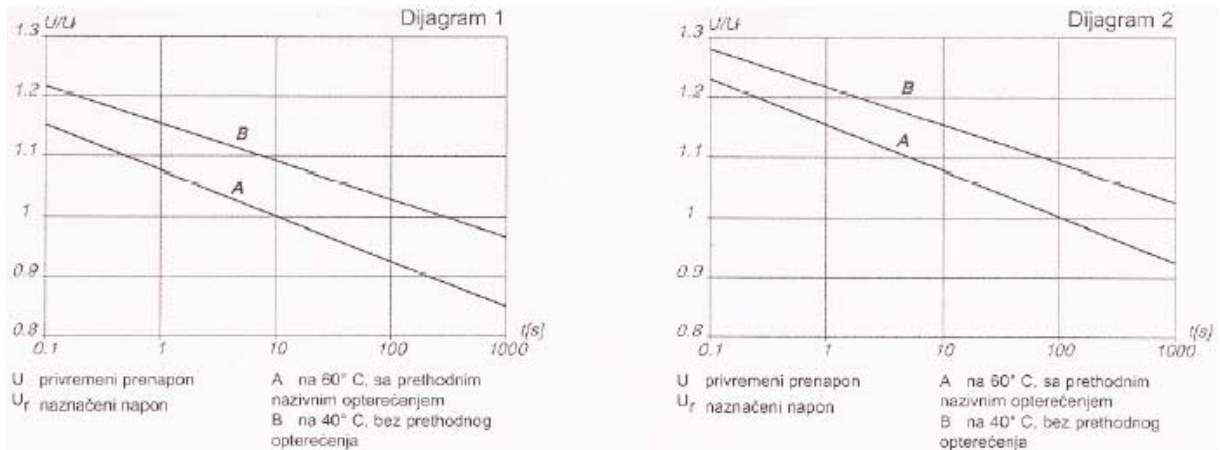
Kao što važi za transformatore 110/20 kV/kV tako ćemo i za distributivne transformatore i kablove skinuti izolacioni nivo na 80 % zbog starosti. Privremeni prenapon je isti:

$$U_{pp} = 26,22 \text{ kV}$$

Primjera radi, ako sa slike 6.1., dijagram 1, odvodnika prenapona klase pražnjenjem voda 1, jednog proizvođača, uzmemo da je $t=0,5$ s dobićemo za koeficijent privremenog prenapona:

$$k_{pp} = 1,12$$

Dijagram 2 važi za odvodnik prenapona klase pražnjenjem voda 2, prema IEC.



Slika 6.1.

Kako je :

$$k_{pp} = \frac{U_{pp}}{U_r} = \frac{1,12}{0,8} = 1,4$$

trajni radni napon je onda:

$$U_c = \frac{U_{pp}}{k_{pp}} = \frac{26,22}{1,4} = 18,73 \text{ kV}$$

Naznačeni napon je:

$$U_r = \frac{U_{pp}}{k_{pp}} = \frac{26,22}{1,12} = 23,41 \text{ kV}$$

Iz kataloga proizvođača uzimamo za:

$$U_{c-iz} = 21 \text{ kV}$$

a pošto je za njega vezan U_r biće:

$$U_{r-iz} = 26 \text{ kV}$$

Sada ćemo provjeriti zaštitne karakteristike izabranog odvodnika prenapona:

Preostali napon U_{res} za struje odvođenja:

- oblik talasa 8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ i 10 kA 69 kV
- oblik talasa 30/60 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ i 0,5 kA 54 kV

Pošto smo smanjili izolacioni nivo transformatora na 80 %, tada je atmosferski napon:

$$125 \cdot 0,8 = 100 \text{ kV}$$

a sklopni napon je:

$$104 \cdot 0,8 = 83,2 \text{ kV}$$

Sada je koeficijent zaštite za atmosferske napone:

$$100 : 69 = 1,45$$

što je veće od 1,4.

Koeficijent zaštite za sklopne napone je:

$$83,2 : 54 = 1,54$$

što je takođe veće od 1,4.

Na osnovu ovih vrijednosti konstatujemo da zaštitne karakteristike izabranog odvodnika prenapona zadovoljavaju.

Sada ćemo izračunati privremene prenapone u trajanju od 1 s:

$$U_{pp}(1s) = k'_{pp} U_{c-iz} = 1,35 \cdot 21 = 28,35 \text{ kV}$$

$$U_{pp}(1s) = k_{pp} U_{r-iz} = 1,08 \cdot 26 = 28,08 \text{ kV}$$

Takođe ćemo izračunati iste za 10 s:

$$U_{pp}(10s) = k'_{pp} U_{c-iz} = 1,25 \cdot 21 = 26,25 \text{ kV}$$

$$U_{pp}(10s) = k_{pp} U_{r-iz} = 1,00 \cdot 26 = 26,00 \text{ kV}$$

Ako uporedimo U_{pp} i $U_{pp}(10s)$ vidimo da je:

$$U_{pp} = 26,22 < U_{pp}(10s) = 26,25 \text{ kV}$$

Vidimo da izabrani odvodnik prenapona izdržava nešto više od 10 s napon U_{pp} .

Sada ćemo izvršiti provjeru energetskog naprezanja odvodnika prenapona, koji je opterećen, na sklopni napon u najnepovoljnijem slučaju.

Ako je preostali napon za sklopnu struju odvodnika prenapona od 0,5 kA 54 kV onda je:

$$U_z = 54 \text{ kV}$$

$$E = 2 \frac{U_p - U_z}{Z} U_z T$$

$$T = \frac{l}{v} = \frac{30}{3 \cdot 10^5} = 0,1 \text{ ms}$$

$$U_p = k U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 3,1 \cdot 24 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 60,64 \text{ kV}$$

Onda je:

$$E = 54 \cdot 10^3 \frac{(60,64 - 54) \cdot 10^3}{400} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 179,28 \text{ J}$$

$$E = 0,179 \text{ kJ}$$

Specifična energija pražnjenja je:

$$\frac{E}{U_{c-iz}} = \frac{0,179}{21} = 0,0085 \text{ kJ/kV } U_c$$

Pošto je energija izabranog odvodnika $4,375 \text{ kJ/kV } U_c$, zaključujemo da energija usljed sklopnih napona ne može oštetiti izabrani odvodnik prenapona.

Za izbor kućišta odvodnika prenapona je mjerodavna struja kratkog spoja u mreži i ona je uvijek jednaka ili manja od $14,5 \text{ kA}$. Izabrani odvodnik prenapona ima eksplozivnu čvrstoću 20 kA , što je dokaz da kućište izdržava i kratak spoj preko aktivnog dijela.

7. LITERATURA

1. M. Savić, Z. Stojković: "Tehnika visokog napona" – atmosferski prenaponi, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Beograd 1996. godina.
2. Lj. Milanković: "Tehnika visokog napona ", Naučna knjiga, Beograd 1987. godina.
3. D. Čomić: Jedan od mogućih načina izbora metal oksidnih odvodnika prenapona za primjenu u elektrodistributivnoj mreži, II savjetovanje o elektrodistributivnim mrežama JUKO CIRED, Herceg Novi , septembar 2000. godina.
4. S. Sadović, Energetska naprezanja ZnO odvodnika prenapona s obzirom na mjesto ugradnje, Sarajevo 1990. godina.
5. Katalozi proizvođača odvodnika prenapona
6. Raychem: Metal- Oxide Surge Arrester: Selection and Application in Medium Networks; 2001. godina.